

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра авіоніки

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Павлова С.В.  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ**  
**“МАГІСТР”**

**Тема: «Цифровий радіовисотомір літака»**

**Виконавець:** Піскурьов Владислав Анатолійович  
(прізвище, ім'я та по батькові) (підпис, дата)

**Керівник:** Слободян О.П.  
(прізвище та ініціали) (підпис, дата)

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**Охорна праці:** Козлітін О.О.  
(прізвище та ініціали) (підпис, дата)

**Охорона навколишнього середовища:** Фролов В.Ф.  
(прізвище та ініціали) (підпис, дата)

**Нормоконтролер:** Левківський В.В.  
(прізвище та ініціали) (підпис, дата)

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Павлова С.В.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020р.

## ЗАВДАННЯ на виконання дипломної роботи

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної роботи: «Цифровий радіовисотомір літака»

затверджена наказом ректора від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін виконання роботи : з \_\_\_\_\_ по \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. Зміст пояснювальної записки: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

8. Дата видачі завдання: “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

Керівник дипломної роботи (проекту) \_\_\_\_\_  
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить 127 сторінки, 47 рисунків , 31 джерело, 3 додатка, 58 формул, складається з трьох розділів.

Об'єктом дослідження є радіовисотоміру з лінійної частотної модуляцією. Метою даної роботи є створення математичної моделі різних модифікацій підстильної поверхні типу ліс.

В процесі роботи була створена математична модель сигналу биття радіовисотомір, що дозволяє досліджувати фацетні моделі різних типів підстильної поверхні. Модель розроблена в математичному пакеті MATLAB.

В результаті досліджень створені математичні моделі підстильної поверхні для різних видів лісів. При моделюванні поверхні було розроблено два підходи. Перший підхід використовує тільки програмний пакет MATLAB і заснований на моделюванні наборів фацетів у вигляді шарів. Другий підхід заснований на побудові необхідної поверхні в програмі тривимірної візуалізації (3Ds MAX) з подальшою обробкою експортованих даних за допомогою розробленої моделі в середовищі MATLAB.

Досліджені підходи моделювання поверхні дозволяють вивчати різні типи підстиляючих поверхонь, акцентуючи увагу на різних параметрах фацетів.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	8
Вступ.....	9
1. Принципи вимірювання висоти в радіовисотомірах з лінійною частотною модуляцією.....	11
1.1 Загальні відомості.....	11
1.2 Принципи виміру висоти в бортових радіовисотомірних системах з безперервним випромінюванням сигналу.....	13
1.2.1 Лічильник нулів.....	15
1.2.2 Стежачий вимірювач частоти сигналу биття.....	16
1.3 Структура спектра сигналу биття.....	19
1.4 Причини спотворень спектра сигналу биття.....	22
2. Загальні принципи математичного моделювання поверхонь.....	33
2.1 Модель відображення радіохвиль від випадкових поверхонь з довільної шорсткістю.....	33
2.2 Моделі опису поверхонь.....	37
2.3 Відображення від земної поверхні.....	39
2.3.1 Параметри, що впливають на відображення від земної поверхні.....	40
2.3.2 Теоретичні моделі земної поверхні і їх обмеження.....	41
2.4 Фацетні модель підстильної поверхні.....	42
2.5 Методи математичного уявлення лісової поверхні.....	44
2.5.1 Моделювання фацетів за допомогою математичного пакета.....	45
2.5.2 Моделювання фацетів за допомогою програми тривимірної візуалізації.....	49
3. Математична модель спектру сигналу биття радіовисотоміру з лчм.....	52
3.1 Вихідні параметри програми.....	52
3.2 Алгоритм розрахунку похилій дальності.....	55
3.2.1 Розрахунок параметрів плями, що освітлюється РВ на підстильної поверхні.....	56

3.3 Розрахунок параметрів фацетів.....	61
3.3.1 Вплив ефекту доплера.....	65
3.3.2 Енергетична характеристика фацетів.....	69
3.4 Розрахунок спектра сигналу биття.....	73
3.5 Загальний підхід до створення шаруватої моделі підстильної поверхні.....	75
3.5.1 Приклад шаруватої моделі соснового лісу.....	79
3.6 Додаткові вхідні параметри для настройки шарів.....	81
3.6.1 Зміни, внесені в тіло циклу.....	82
3.7 Опис функції розрахунку параметрів фацетів layer.m.....	83
3.8 Моделювання підстильної поверхні за допомогою програми тривимірної візуалізації.....	86
3.8.1 Для отримання координат з програми 3DS MAX.....	86
3.8.2 Опис функції розрахунку параметрів фацетів layer3d.m.....	88
4. Охорона праці.....	91
4.1. Перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів при технічній експлуатації.....	92
4.2. Технічні заходи, що виключають або обмежують вплив на технічний персонал небезпечних або шкідливих виробничих факторів при експлуатації обладнання систем авіоніки.....	95
4.2.1. Забезпечення електробезпеки.....	95
4.2.2. Нормалізація освітлення.....	96
4.2.3. Забезпечення пожежної і вибухової безпеки.....	97
4.3. Інструкція з охорони праці під час експлуатації проектного об'єкту.....	100
4.3.1. Основні положення.....	100
4.3.2. Вимоги до безпеки перед початком роботи.....	100
4.3.3. Вимоги до безпеки під час роботи.....	101
4.3.4. Вимоги до безпеки після закінчення роботи.....	103
4.3.5. Вимоги до безпеки в аварійних ситуаціях.....	103

5. Охорона навколишнього середовища.....	105
5.1. Аналіз впливу техногенних чинників на навколишнє природне середовище.....	105
5.2. Вплив матеріалів, що використовуються при виготовленні цифрового радіовисотоміра на навколишнє середовище.....	108
5.2.1. Вплив виробництва пластмасових виробів .....	108
5.2.2. Процес механічної обробки металів як джерело забруднення навколишнього середовища.....	110
5.2.3. Деякі аспекти впливу міського шуму на здоров'я людини і шляхи зниження його негативного впливу.....	112
Висновок.....	115
Список використаної літератури.....	117
Додатки.....	121

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

ВЧ – висока частота;

ДНА – діаграма напрямленості антени;

ДЗР– діаграма зворотного розсіювання;

ЛА – літальний апарат;

ЛЧМ – лінійна частотна модуляція;

НЛЧМ – несиметрична лінійна частотна модуляція;

НЧ – низька частота;

ПП – подстилающая поверхня;

РВ – радіовисотомір;

РЛС – радіолокаційна станція;

НВЧ– надвисока частота;

СЛЧМ – симетрична лінійна частотна модуляція;

ФНЧ – фільтр низьких частот;

ЧМ – частотна модуляція;

ЕПР – ефективна площа розсіювання.



## ВСТУП

Вимірювання висоти польоту ЛА над підстильної поверхнею має важливе значення в забезпеченні безпеки всіх польотів. Сьогодні для вирішення питань вимірювання висоти застосовують радіовисотомір. Радіовисотомір призначений для вирішення широкого кола тактичних завдань, перерахуємо деякі з них:

- пілотування літаків і вертольотів на всіх етапах польоту від зльоту до посадки;
- дистанційні вимірювання рельєфу земної поверхні і поверхні планет;
- автоматичне керування в системах м'якої посадки космічних апаратів на поверхні планет;
- автоматичне керування при виведенні ЛА на балістичні траєкторії;
- визначення висоти поточної орбіти ШС Землі і планет;
- датчики висоти різних застосувань.

Виходячи з кола вирішуваних завдань, очевидно, що існують різні типи радіовисотоміру. В основному вони відрізняються видом модуляції і методом виконання.

Однією з найбільш важливих завдань, покладених на висотомір, є вимір висоти ЛА щодо підстильної поверхні. Особливий інтерес представляє вимірювання висоти над лісовою поверхнею. З проблемою вимірювання висоти польоту над лісом зазвичай стикаються на малих і гранично малих висотах. В умовах обмеженої видимості (темний час доби, дощ, сніг, туман) ситуація серйозно ускладнюється. Для успішного виконання завдання пілот повинен мати можливість визначати висоту як до шару ґрунту, так і до верхівок дерев.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі спектра сигналу биття радіовисотомір з лінійної частотної модуляцією, а також вивчення методів моделювання різних типів поверхонь. Основним завданням стоїть розробка різних математичних моделей лісової поверхні.

Моделювання лісової поверхні - питання, яке слабо висвітлений у книгах, присвячених радіолокації і радіовисотометрії, що робить вивчення питань моделювання лісової поверхні актуальним на сьогоднішній день. У даній роботі використані два методи моделювання поверхонь. Перший метод реалізований в середовищі MatLAB і є математичною багатоплановою ґратною моделлю різних типів поверхонь з підлаштуваними параметрами.

Новизна дослідження полягає в другому методі моделювання поверхонь. За основу взята тривимірна графіка, а саме, поверхня спочатку будується в програмі тривимірної візуалізації, а потім дані про координати об'єктів тривимірного зображення відповідним чином обробляються і передаються в середу MatLAB, де розроблена математична модель розраховує і будує графік спектра сигналу биття.

Слід зазначити, що в даній роботі буде досліджено радіовисотомір з безперервним випромінюванням, а закон модуляції буде несиметричний (несиметрична лінійна частотна модуляція). В якості основних робочих параметрів будуть обрані типові значення.

# 1. ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ В РАДІОВИСОТОМІРАХ З ЛІНІЙНОЮ ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ.

Даний розділ присвячений огляду загальних теоретичних уявлень про роботу бортових радіовисотоміру з лінійної частотної модуляцією, дано поняття частоти биття, спектра сигналу биття. Розглянуто основні причини спотворення спектра сигналу биття.

## 1.1 Загальні відомості.

Радіовисотоміри призначенні для виміру істинної висоти польоту літальних апаратів. Так як вони не потребують додаткового наземного обладнання, то вони відносяться до класу автономних радіолокаційних установок.

Для роботи радіовисотомірів є спеціально виділені частоти, це: 440, 1600-1900 і 4300 МГц

Радіохвилі можуть поширюватися на великі відстані, огинати перешкоди, проникати у глибини суші та води, будинки та споруди, проходити крізь хмари, туман та опади. Радіохвилі деяких частот здатні відбиватися від об'єктів, що знаходяться в області їх поширення. У зв'язку з цим реалізується можливість їх виявлення та вимірювання параметрів руху. Радіохвилі, що відбиваються різними за фізичними й електродинамічними властивостями поверхнями, забезпечують вивчення характеристик цих поверхонь.

Для вимірювання висоти польоту різних літальних апаратів щодо підстильної поверхні використовуються різні бортові системи для виміру висоти. Радіовисотомір є необхідним приладом, що входять до складу

Кафедра авіоніки					НАУ 19 07 83 000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ В РАДІОВИСОТОМІРАХ З ЛІНІЙНОЮ ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ.	Літ.	Арк.	Аркушів
Виконав		Піскурьов В. А.						
Керівник.		Слободян А.П.					11	
Консульт.		Слободян А.П.				173 Авіоніка		
Н. Контр.		Левківський В.В.						
Заф.каф..		Павлова С.В.						

радіообладнання сучасних ЛА. Перелічимо основні тактичні завдання, які вирішуються РВ:

- пілотування літаків і вертольотів на всіх етапах польоту від зльоту до посадки;
- дистанційні вимірювання рельєфу земної поверхні і поверхні планет;
- автоматичне керування в системах м'якої посадки космічних апаратів (КА) на поверхні планет;
- датчики висоти різних застосувань і багато інших завдань. Радіовисотомір є різновидом радіолокаційних станцій (РЛС), які в якості мети використовують підстилаючу поверхню.

Сучасні методи модернізації радіовисотоміру спрямовані на поліпшення точності вимірюваної висоти в усьому робочому діапазоні, на підвищення стабільності і точності вимірювання висоти при наявності швидкості ЛА і його еволюцій в просторі (крен, тангажу, ристання). Сучасні технології дозволяють виробляти як апаратну модернізацію, так і впровадження і поліпшення програмних алгоритмів обробки сигналів.

За типом радіовипромінювання і методу його обробки все бортові радіовисотомір можна поділити на дві групи:

- з частотною модуляцією: мають діапазон вимірювань до декількох сотень метрів (зазвичай до 1500 м) і широко використовуються при польотах на малих висотах і при посадці;
- з імпульсною модуляцією: призначені для вимірювання великих висот і застосовуються переважно у військовій авіації, в космонавтиці і в інших спеціальних цілях.

## 1.2 Принципи виміру висоти в бортових радіовисотомірних системах з безперервним випромінюванням сигналу.

При вимірі висоти для отримання максимально чіткого і потужного сигналу від випромінюючої антени використовують антени які направленні перпендикулярно до поверхні ( Рис. 1.1)

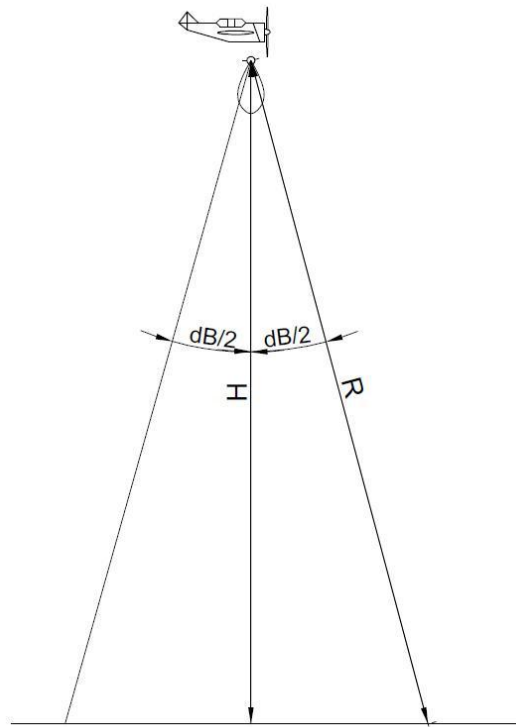


Рис. 1.1 Для РВ використовують вертикальне випромінювання

Застосування лінійної частотної модуляції випромінюваного сигналу дозволяє створити висотомір з безперервним випромінюванням, що забезпечує високу точність і роздільну здатність. Визначення висоти частотним методом зводиться до вимірювання зміни частоти випромінюваних коливань за час поширення сигналу до підстилаючої відбиваючої поверхні і назад [18].

Роботу висотоміра при постійному рівні висоти (відсутності вертикальної швидкості ЛА) пояснює тимчасова діаграма (Рис.1.2).

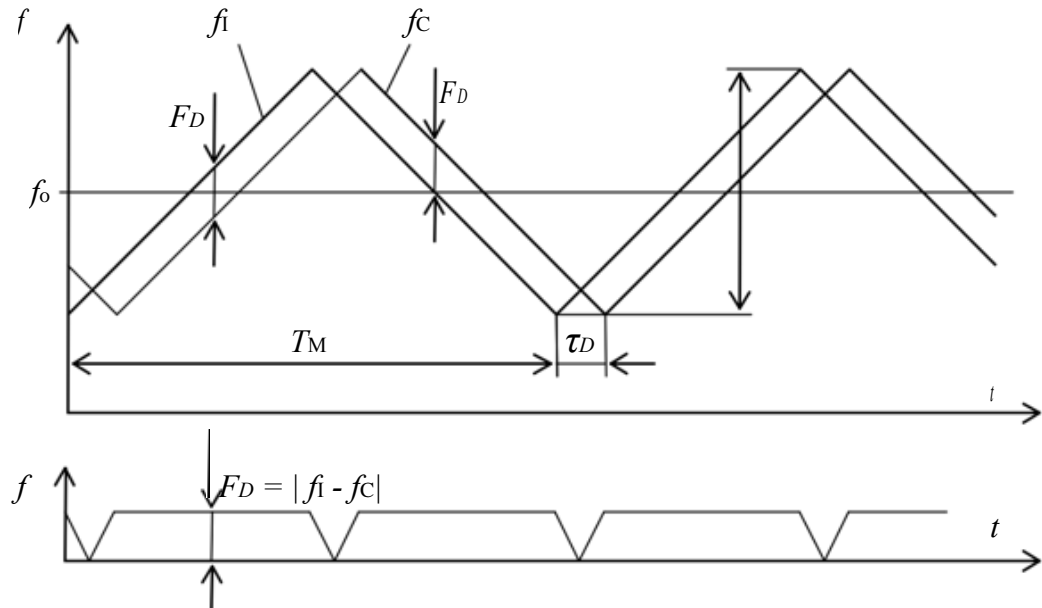


Рис. 1.2 Тимчасова діаграма роботи РВ з ЛЧМ

Верхній графік показує зміну частоти випромінюваних (суцільна лінія) і прийнятих (пунктирна лінія) коливань, що мають середню частоту  $f_0$ , період модуляції  $T_M$  і девіацію частоти  $W$ . Нижній графік відтворює зміну далекомірної частоти  $F_D$ , званої також частотою биття. Частота випромінюваних коливань  $f_1$  змінюється безперервно за лінійним законом зі швидкістю:

$$Y_M = \frac{df_1}{dt} = \frac{2Wf}{T_M}, \quad (1.1)$$

$$f_1 = f_0 + Y_M t = f_0 + \frac{2W}{T_M} t. \quad (1.2)$$

Частота прийнятих коливань  $f_c$  аналогічно змінюється безперервно за лінійним законом, але затримана на час поширення сигналу  $\tau_D = \frac{2H}{c}$ , де  $c$  - швидкість світла:

$$f_c = f_0 + Y_M(t - \tau_D) = f_0 + \frac{2W}{c} \left( t - \frac{2H}{c} \right). \quad (1.3)$$

Вимірюючи різницю частот випромінюваних і прийнятих коливань, визначимо далекомірну частоту  $F_D$ , яка також називається частотою биття:

$$F_D = f_1 - f_c = \frac{4W}{cT_M} H. \quad (1.4)$$

Вираз для (1.4) не враховує провали кривої  $F_D(t)$  зонах звернення при  $f_1 \approx f_C$ , при обліку яких частотомір зафіксує середню частоту биття за період модуляції:

$$F_C = \frac{4W}{cT_M} H \left( \frac{T_M - \tau_D}{T_M} \right). \quad (1.5)$$

При виконанні умови  $\tau_D \ll T_M$  зонами звернення можна знехтувати, середня частота биття  $F_C \approx F_D$ . Отже, при СЛЧМ значення висоти  $H$  пропорційно частоті биття:

$$H \approx \frac{cF_D}{4W \cdot F_M}. \quad (1.6)$$

Вимірювання висоти по сигналу биття може бути виконано з різною точністю в залежності від способу обробки цього сигналу. Перерахуємо деякі способи обробки прийнятого сигналу нижче.

### 1.2.1 Лічильник нулів.

У перших, найбільш простіх системах виміру висоти в якості частотоміра використовували лічильник імпульсів (лічильник нулів), який фіксував ціле число биття за період модуляції:

$$n_D = F_D T_M = \frac{4W}{c} H. \quad (1.7)$$

Виміряна висота  $H$  при цьому відповідає середньоквадратичній частоті [13] (центру тяжіння) в спектрі сигналу биття.

Дискретність  $\Delta H$ , відповідна роздільної здатності такого РВ, може бути знайдена по зміні числа биття  $n_D$  на одиницю зі співвідношення:

$$n_D \pm 1 = \frac{4W}{c} (H + \Delta H), \quad (1.8)$$

звідси

$$\Delta H = \frac{c}{4W} = \lambda_M / 4. \quad (1.9)$$

де  $\lambda_M = \frac{c}{W}$  - так звана модуляційна довжина хвилі.

Від дискретності відліку  $\Delta H$  в такому вимірнику можна позбутися, якщо вимірювати число биття за період модуляції з урахуванням дробової частини, або так варіювати параметри модуляції, щоб на періоді модуляції її завжди вкладалося це ціле число періодів сигналу биття.

### 1.2.2 Стежачий вимірювач частоти сигналу биття.

Розглянемо основні принципи побудови стежачь РВ з ЛЧМ. Для усунення постійної похибки необхідно, щоб при будь-якому значенні вимірюваної висоти виконувалося рівність  $F_i = F_H$ . Єдиним способом виконання цієї умови є авторегулювання параметрів частотної модуляції в залежності від часу приходу відбитої від підстильної поверхні радіохвилі.

При регулюванні і вимірі розмаху зміни частоти  $W$  виходить незручна зворотна залежність вимірюваного відстані від  $W$ . В цьому відношенні більш вигідно регулювати період модуляції якого, як нижче буде показано, характерна лінійна зв'язок  $T_M$  з вимірюваною висотою  $H$ . Різні модифікації цього методу набули найбільшого поширення.

Вихідну ідею роботи висотоміра зі стабілізацією далекомірної частоти биття  $F_D$  при постійних значеннях середовищ ній робочої частоти  $f_0$  і діапазону використовуваних частот  $W$  пояснюють рисунки для двох варіантів значення швидкості зміни частоти зондуючого сигналу  $Y_M = \pm \frac{W}{T_M}$  (Рис 1.3 і Рис. 1.4).

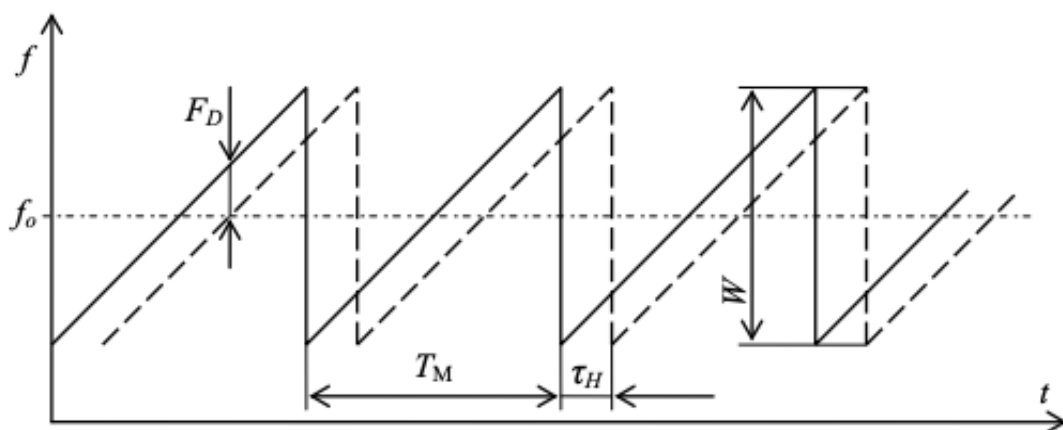


Рис. 1.3 Діаграма НЛЧМ для  $Y_M = +\frac{W}{T_M}$



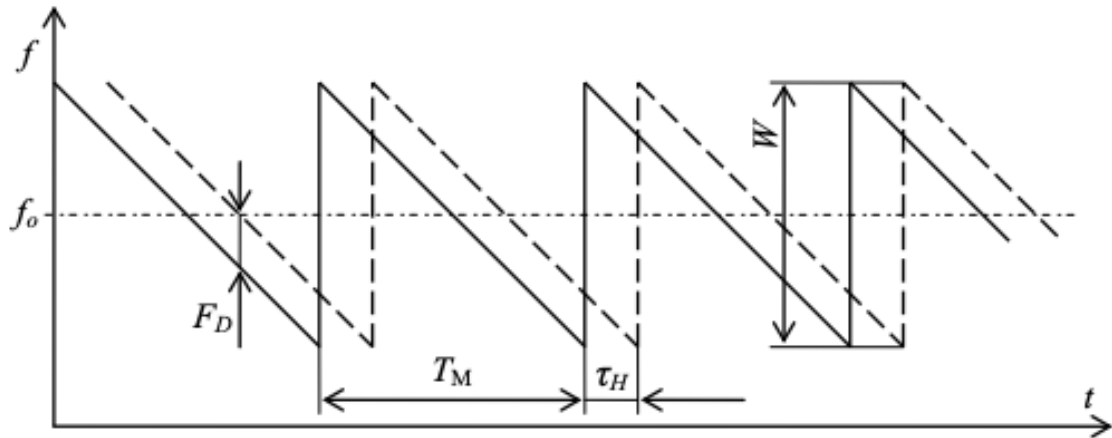


Рис. 1.4 Діаграма НЛЧМ для  $Y_M = -\frac{W}{T_M}$

Безперервної лінією показаний закон зміни частоти випромінюваного сигналу, а штриховий - прийнятого. Далекомірною частотою биття між випромінюваною і прийнятою сигналами для НЛЧМ знаходимо співвідношенням:

$$F_D = \frac{2W}{cT_M}. \quad (1.10)$$

Величини  $F_D$  і  $W$  підтримуються постійними, а в якості регульованого і вимірюваного параметра обраний період модуляції  $T_M$ . При цьому його зв'язок з  $H$  визначається зі ставленням:

$$T_I = \frac{2W}{cT_M} H, \quad (1.11)$$

тобто при цих умовах  $T_M$  прямо пропорційний  $H$ .

Частота биття  $F_D$  підтримується постійною шляхом авторегулювання  $T_M$  по ланці зворотного зв'язку, що замикається через шлях радіохвиль від РВ до підстилаючої поверхні і назад. При цьому сталість  $F_D$  дозволяє використовувати вузькосмуговий приймач з відповідним виграшем енергоспоживання.

Розглянемо принцип роботи стежить радіовисотоміра, заснованого на вимірюванні періоду модуляції (Рис. 1.5).

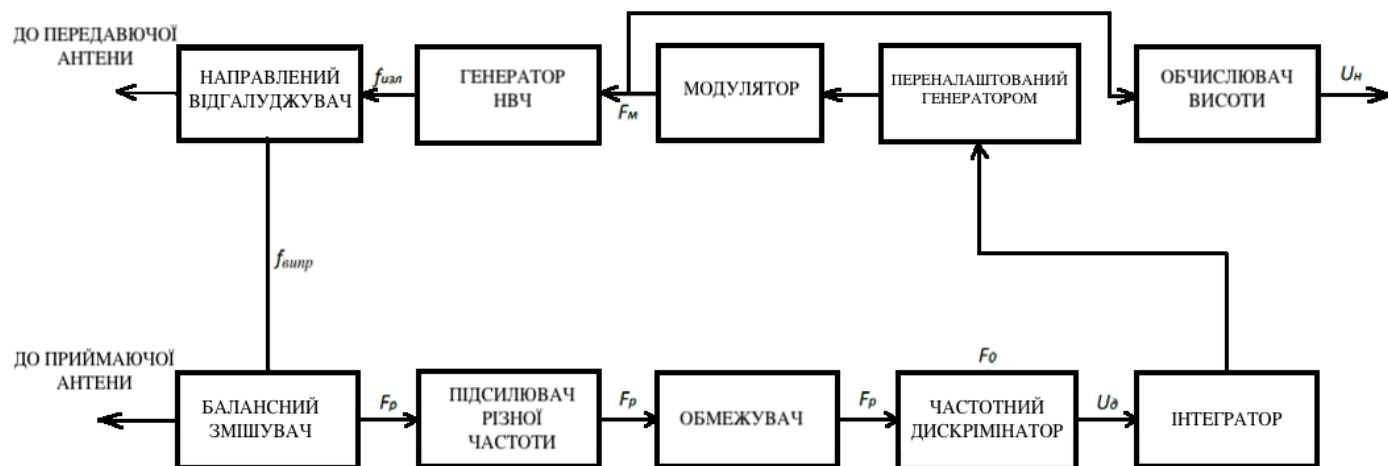


Рис. 1.5 Структурна схема стежить РВ

Генератор НВЧ під впливом модулятора формує сигнал, частотно-модульований по симетричному трикутному закону. Цей сигнал направленим відгалужувачем ділиться на дві частини: основна частина випромінюється через передавальну антену в напрямку земної поверхні, решта, а також відбитий сигнал надходять на балансний змішувач. Напруга різницевої частоти  $F_p$ , що утворюється на виході балансного змішувача, посилюється і фільтрується в підсилювачі різницевої частоти, обмежується по амплітуді в обмежувачі і далі надходить на частотний дискримінатор, що має перехідну частоту  $F_0$ . З виходу дискримінатора знімається напруга:

$$U_d(t) = K(F_p - F_0), \quad (1.12)$$

де  $K_d$  - коефіцієнт передачі дискримінатора.

Вихідна напруга дискримінатора (сигнал помилки)  $U_t(t)$  після інтегрування в інтеграторі зі скиданням як керуючого напруги надходить на перебудовується генератор. Під впливом керуючої напруги частота вихідного сигналу перебудовується генератора (визначальна частота модуляції  $F_M$ ) змінюється в заданих межах. Модулятор формує закон зміни амплітуди сигналу частоти  $F_M$ , відповідно до якого змінюється частота випромінювання генератора НВЧ. Перебудова перебудовується генератора, а отже і зміна значення  $F_M$  відбувається до тих пір, поки не стане виконуватися рівність

$F_p = F_0$ , після чого на виході частотного дискримінатора спостерігається  $U_d = 0$ . При цьому рівняння частотного радіовисотомір з вимірюванням періоду модуляції має вигляд:

$$T_M = \frac{8\Delta f}{cF_0} H, \quad (1.13)$$

де  $\Delta f$ - девіація частоти,  $F_0$ - перехідна частота частотного дискримінатора.

Слід зазначити, що цей вислів справедливо тільки для симетричного трикутного закону модуляції [28].

При такій схемі роботи РВ, виміряне значення висоти буде визначатися настройками і типом частотного дискримінатора, що є ланкою, чутливим до зміни частоти вхідного сигналу. Найбільш проста реалізація - налаштування на центр ваги спектра сигналу биття, що пройшов через УНЧ - фільтр сигналу биття. Складніша - налаштування на передній фронт за допомогою виділювачів мінімальної частоти [13] спектра сигналу биття, найбільш точно відповідній найкоротшій віддалі до підстильної поверхні.

Існують РВ на базі аналізаторів спектра, в яких сигнал биття, отриманий перетворенням на змішувачі, після УНЧ поступає на набір смугових фільтрів або, при цифровій обробці, в блок БПФ [21]. Для розуміння характеристик таких РВ розглянемо особливості спектра сигналу биття.

### **1.3 Структура спектра сигналу биття.**

Дослідження частотних складових відбитого сигналу в РВС розглядають на НЧ у вигляді сигналу биття, який отримують після перетворення на змішувач, коли прийнятий НВЧ сигнал перемножується з випромінюваним, а потім фільтрується ФНЧ.

Розподіл енергії в спектрі сигналу биття досліджено і описано в працях багатьох авторів (Жуковський А. П., Вінницький А. З., Зубкович З. Г., Комаров І. В. та інші). На Рис. 1.6 наведені експериментальні нормовані огинають

спектру сигналу биття при лінійних законах ЧС для вертикального зондування стаціонарних морських поверхонь різного рівня хвилювання [18].

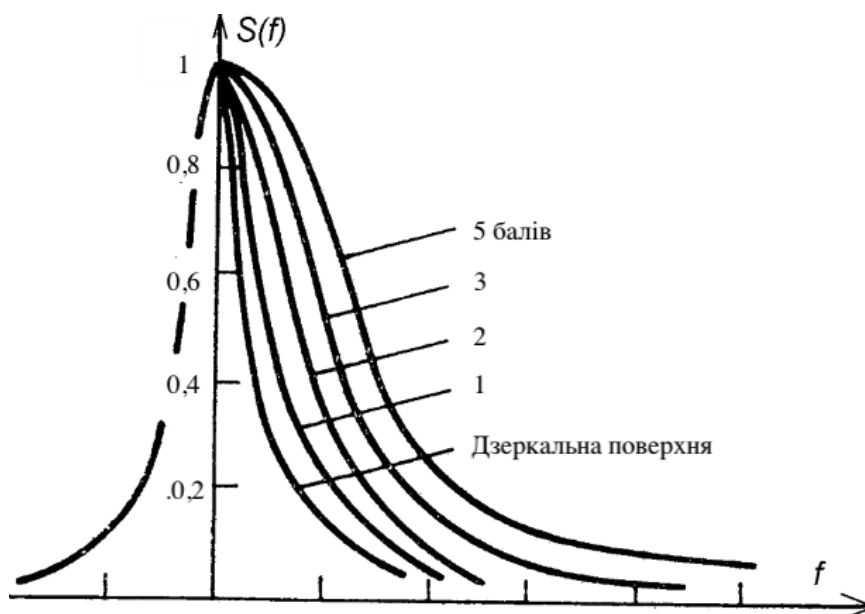


Рис. 1.6 Нормований огибающий спектр сигналу биття

На Рис. 1.6 видно, що огибаюча має несиметричний вигляд і розтягнута праворуч завдяки протяжності поверхні. Для пояснення форми і асиметрії спектра розглянемо процес формування спектра сигналу биття з точки зору методу кілець однакової дальності (Рис. 1.7) [13].

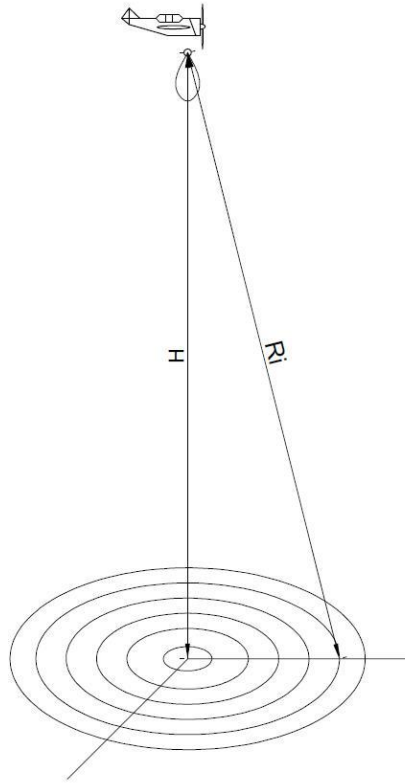


Рис. 1.7 Метод кілець однакої дальності

Амплітуда гармоніки сигналу для деякого віддалення пропорційна площі поверхні, що знаходиться на цій дальності. Якщо розбити опромінюється площину на концентричні кільця, то їх площа можна записати в наступному вигляді:

$$S = S_1 - S_2 = \pi r_1^2 - \pi r_2^2 = \pi(r_1^2 - r_2^2) = \pi(r_1 - r_2)(r_1 + r_2), \quad (1.14)$$

де  $S_1$  і  $S_2$  – площі концентричних кіл,

$r_1$  і  $r_2$  – радіуси цих кіл.

Прийmemo:  $r_1 + r_2 = 2r$ ,  $r_1 - r_2 = \Delta r$ , тоді  $S = 2\pi r \Delta r$ .

Звідси напруга  $i$ -й гармоніки:

$$U_i = \left(\frac{H}{R_i}\right) G_i \sqrt{\sigma_i} 2\pi r \Delta r, \quad (1.15)$$

де  $G_i$  і  $\sigma_i$  – коефіцієнти обліку ДНА і ДЗР в напрямку  $i$ -го кільця,  $R_i$  – похила дальність до зовнішнього радіуса  $i$ -го кола.

Або:

$$U_i = \left(\frac{H}{R_i}\right) G_i \sqrt{\sigma_i} 2\pi \sqrt{R_i^2 - H^2} \Delta r, \quad (1.16)$$

Проаналізувавши формулу (1.16), можна виявити, що при похилих дальностях, близьких до висоти, тобто, малих кутах похилій дальності, напруга  $i$  – ої гармоніки зростає за рахунок збільшення другого радикала у формулі спочатку швидко (як функція  $x$ ), формуючи різкий передній фронт спектра гармонік, потім повільно. Зміна ДНА і ДЗР в цих кутах невеликі в порівнянні зі зміною радикала, і зі збільшенням номера гармоніки її напруга зростає. При великих кутах (тобто,  $R_i \gg H$ ), навпаки, величини ДЗР і ДНА, а також квадрат відносини висоти до похилої дальності будуть швидко зменшуватися, а швидкість збільшення радикала помітно знизиться. Це призведе до появи заднього фронту, а, отже, спектр сигналу биття повинен мати яскраво виражений пік.

В області великих кутів похилій дальності ДНА і ДЗР зменшуються набагато повільніше, ніж зростає значення радикала в області малих кутів, тому задній фронт матиме значно меншу крутизну, ніж передній. Асиметрія характерна для спектрів сигналів биття ЛЧМ РВ, різна для морських поверхонь різного рівня хвилювання, що пояснюється різною залежністю  $\sigma_i$  - коефіцієнтів обліку ДЗР в напрям відповідних кілець для різних поверхонь. Ці залежності можна спрощено апроксимувати аналогічно ДНА і охарактеризувати відповідним параметром, який називають шириною ДЗР.

#### 1.4 Причини спотворень спектра сигналу биття.

Відбитий сигнал формується від великої ділянки поверхні, в ньому закладена інформація не тільки про висоту польоту  $H$ , а й про різні похилі дальності  $R_1, R_2, \dots, R_i$  в межах, обмежених діаграмами спрямованості антен. Нижче показано формування окремих складових відбитого сигналу від ділянок - зон відображення на підстильній поверхні (Рис. 1.8), що відрізняються різними значеннями похилих дальностей, при незміщеної і відхиленої ДНА.

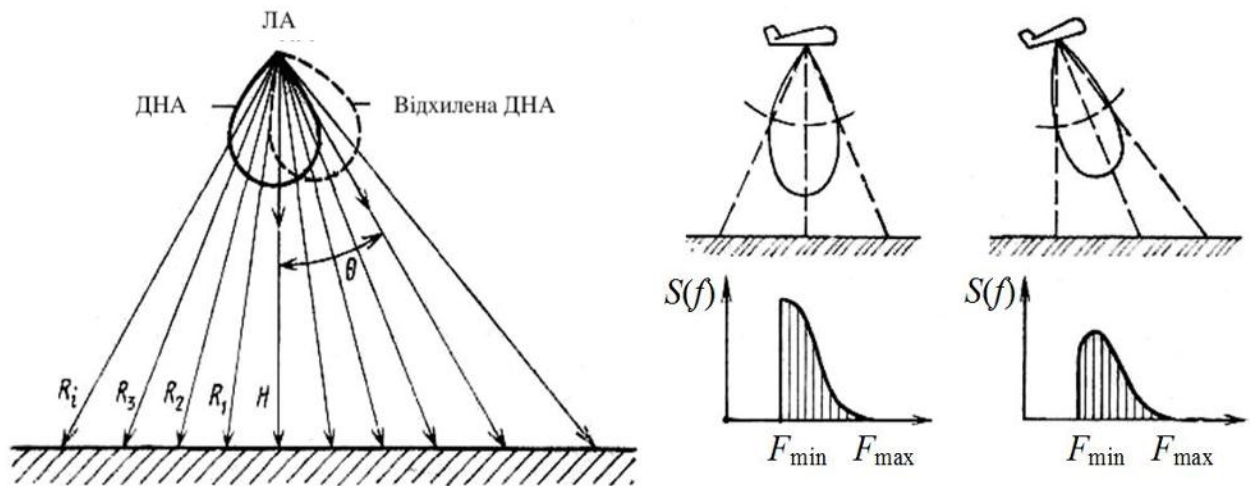


Рис. 1.8 Формування складових відбитого сигналу

Нижче (Рис. 1.9) відображено принцип формування відповідних спектральних складових сигналу при умовному відокремленні на підстильній поверхні дискретних зон відображення біля зображених  $H$ ,  $R_1, \dots, R_i$ . Гармоніці сигналу биття  $F_{min}$  буде відповідати область відбиває близькою до нормалі  $H$ , а гармоніці сигналу биття  $F_{max}$  буде відповідати області відбивання біля максимальної похилої дальності в межах поточного становища ДНА  $R_i$  [5].

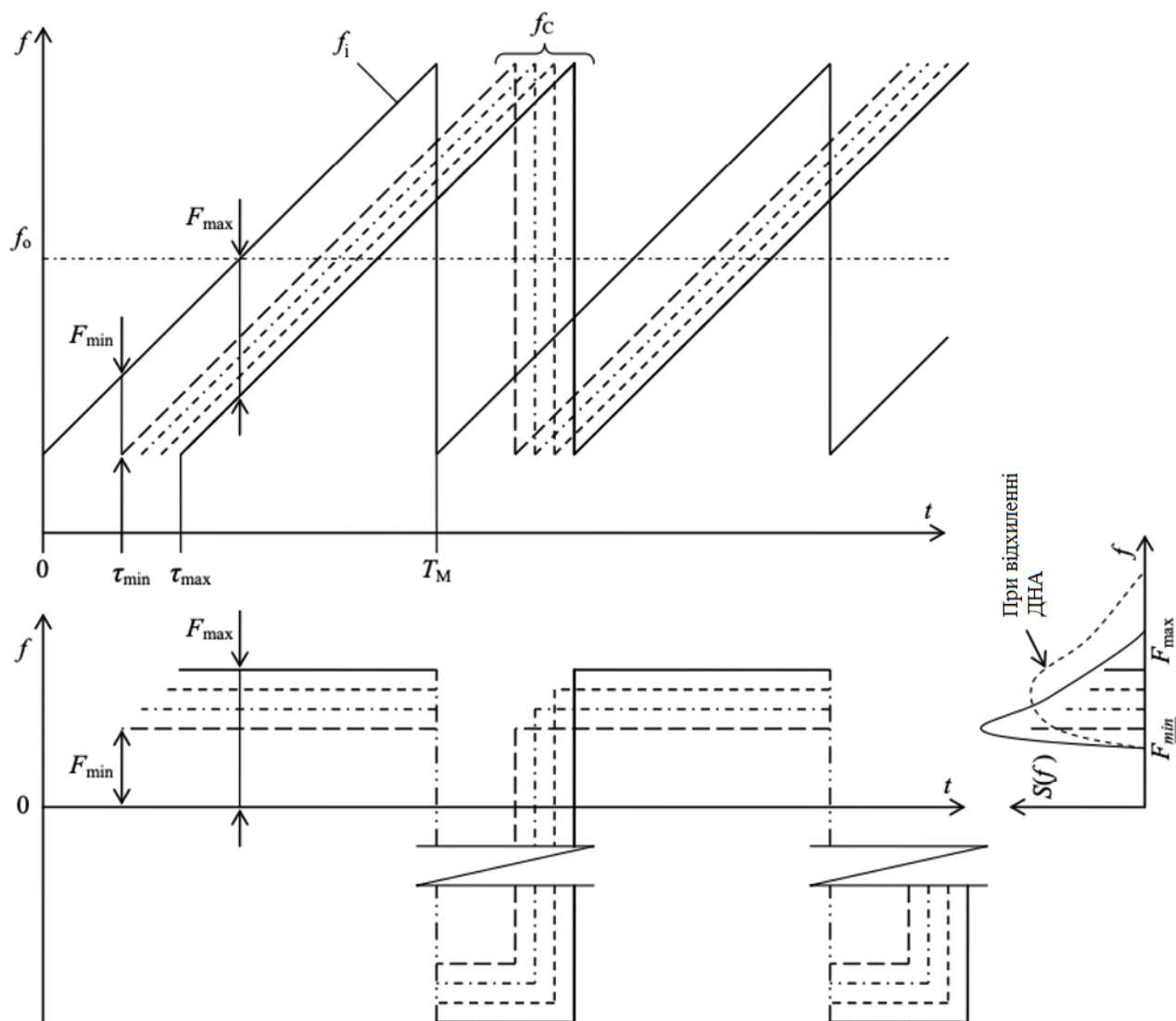


Рис. 1.9 Принцип формування відповідних гармонік і форми обвідної спектра сигналу биття при НЛЧМ для дискретних зон відображення на підстильної поверхні

Вид окремих складових сигналу биття  $f_{ci}(t)$  в області стрибкоподібного зміни частот показаний, але не розглядається далі в силу відсутності впливу цієї ділянки на вимірювання через його малу відносну тривалість і не потрапляння його в робочу смугу фільтра сигналу биття (у багатьох РВ цю ділянку виключають методом стробування). На цьому ж малюнку приведена зразкова огибаюча спектра сигналу биття  $S(f)$  ширина якої визначається різницею  $\Delta F = F_{max} - F_{min}$ , а форма в спрощеному розумінні залежить від



амплітуд складових сигналів відображених відповідними дискретними зонами відображення. При відхиленні ДНА (Рис. 1.8) очевидно зміняться і ширина і форма обвідної спектра сигналу биття  $S(f)$ .

Розподіл енергії в спектрі визначається шириною, формою ДНА і ДЗР поверхні, їх відхиленням від вертикалі. При кренах ЛА максимум обвідної спектра зміщується в сторону більш високих частот, але нелінійно, так як для великих похилих дальностей амплітуди сигналів швидко зменшуються (1.16), тобто  $F_{max}$  задається, наприклад, як гармоніка з заданим абсолютним або відносним рівнем від максимальної гармоніки, зміщується непропорційно куту відхилення. Важливо, що при кренах нижня частота зрізу спектра, відповідна істинної висоті польоту ЛА, не змінюється. Правда, при великих кренах потужність сигналу на частоті  $F_{min}$  також може стати нижче допустимого рівня. Щоб цього уникнути, зазвичай ширина ДНА на рівні половинної потужності береться більше максимально можливого кута крену. Загальну залежність розширення спектра при відхиленні ДНА від величини відхилення можливо отримати експериментально або шляхом моделювання для точно заданих параметрів ДНА і ДЗР поверхні [8].

Цей приклад (Рис. 1.9) відповідає НЛЧМ з позитивним коефіцієнтом швидкості зміни частоти  $Y_M > 0$ .

При зміні висоти в  $N$  разів, для неслідкуючого РВ, пропорційно зміняться значення  $\tau_{min}$ ,  $\tau_{max}$ ,  $F_{min}$ ,  $F_{max}$ . Тоді загальна ширина спектра також зміниться в  $N$  разів:

$$\Delta F_{H=N \cdot H_0} = N \cdot F_{min} = N \cdot \Delta F_{H=H_0}. \quad (1.17)$$

При зміні висоти амплітудні співвідношення для всіх гармонік залишаються колишніми, але площа опромінюваної поверхні змінюється, тому зміниться вплив нерівностей і окремих «яскравих» точок реальної поверхні на характер спектру: зі збільшенням висоти можна очікувати зменшення рівня флуктуацій окремих гармонік в неупосередкованих спектрах.

Для слідкуючого РВ, зміни значення  $H$ , впливають на  $\tau_{min}, \tau_{max}$ , змінюють  $Y_M$  і тому не впливають на  $F_{min}, F_{max}$ . Загальна ширина спектра не зміниться. Якщо ввести поняття відносної ширини спектра  $\Delta F_{H_{0TH}} = \Delta F_{H=H_i} / F_{Di}$ , де  $F_{Di}$  - середня частота в спектрі сигналу биття, то для всіх типів РВ при будь-якій зміні висоти можна в загальному вигляді записати:  $\Delta F_{H_{0TH}} = \text{const}$ . Тут не враховується вплив дискретності спектра сигналу биття викликаній обмеженістю періоду модуляції і, як правило, фіксованим значенням часу дискретизації при оцифруванні сигналу биття.

Для СЛЧМ період модуляції складається з двох напівперіодів з  $Y_M > 0$  і  $Y_M < 0$ . Нижче (Рис. 1.10) відображений принцип формування відповідних спектральних складових сигналу при СЛЧМ для тих же умовних дискретних зон відображення біля  $H, R_1, \dots, R_i$ . Негативна частина спектра  $S(f)$  для кращого сприйняття умовно «залишена» в негативній частині: насправді при перетворенні на змішувачі ця частина спектра «відіб'ється» в позитивній частині і при усередненні накладеться на спектр отриманий на першій половині періоду модуляції  $T_M$ . Таким чином, кожній області відбиваючої поверхні при СЛЧМ умовно будуть відповідати дві гармоніки сигналу биття, при цьому графіки і спектр сигналу першої половини періоду модуляції  $T_M$  СЛЧМ будуть відповідати періоду модуляції НЛЧМ з  $Y_M > 0$ , а графіки і спектр сигналу другої половини періоду модуляції СЛЧМ - періоду модуляції НЛЧМ з  $Y_M < 0$ . У відсутності вертикальної швидкості, а також при невідхиленому ДНА або відсутності горизонтальної швидкості, спектри сигналів биття для обох видів НЛЧМ і СЛЧМ однакові.

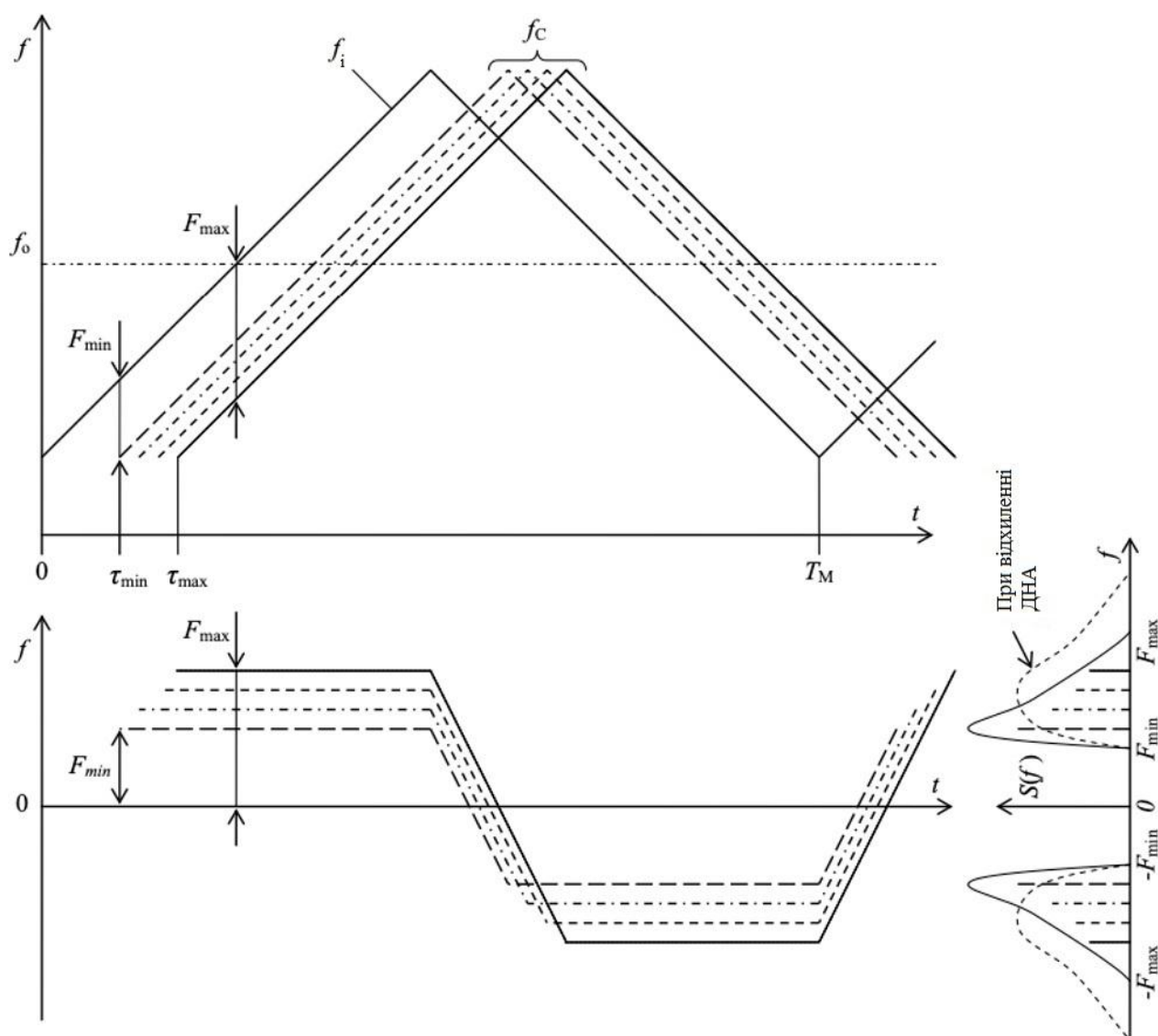


Рис. 1.10 Принцип формування відповідних гармонік і форми обвідної спектру сигналу биття при СЛЧМ для дискретних зон відображення на підстилаючої поверхні

При наявності вертикальної швидкості для кожної зони відображення від поверхні з'являється доплерівське зрушення, зміщуючи окремі графіки  $f_c$  і спектри в сторону відповідну напрямками вектора швидкості і знаку змін несучої частоти. Нижче (Рис. 1.11) показаний приклад для СЛЧМ:  $S(f)$  зміститься на величину  $fd$ .

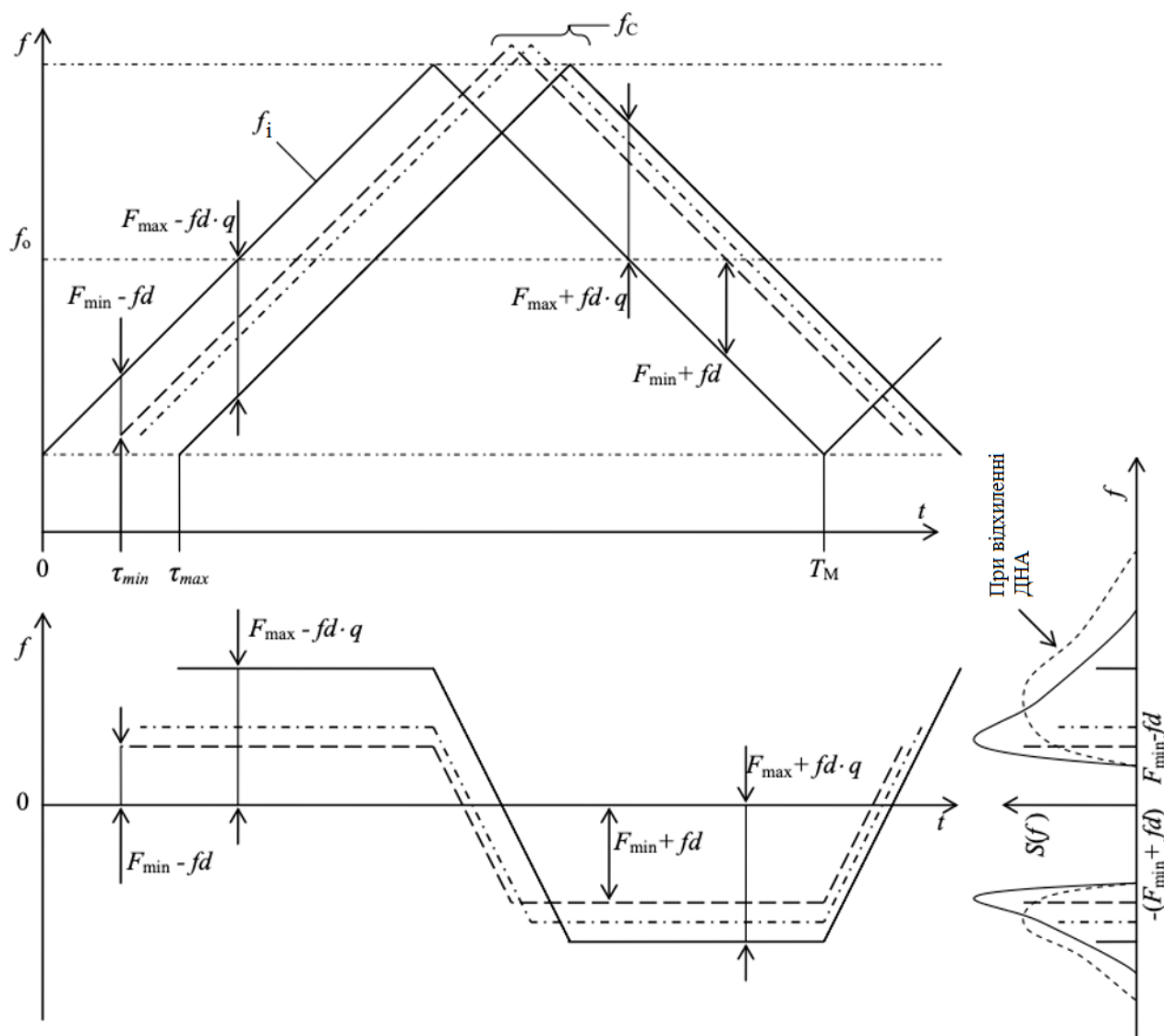


Рис. 1.11 Принцип формування відповідних гармоніки і форми обвідного спектру сигналу биття при СЛЧМ при зниженні ЛА

Фактичний зрушення  $fd$  для всіх зон різний: для зон поблизу нормалі це зміщення максимально, а для інших зон зміщення менше на косинус кута візування  $\gamma$ . Тому на малюнку зміщенням для  $F_{\max}$  зменшено множенням  $fd$  на значення  $q = \cos(\gamma) < 1$ , саме доплерівське зміщення для цієї далекої зони умовно не показано для візуального сприйняття спотворення загальної ширини спектра. Підсумковий ефект при цьому: при зниженні ЛА разом зі зміщенням йде невелике розширення або стиснення спектра для першої і другої відповідних половин зображеного для СЛЧМ періоду модуляції. Для

СЛЧМ РВ при усередненні спектра велика величина  $fd$  призводить до роздвоєння спектра (для типових параметрів серійних гелікоптерних РВ другий максимум спостерігається вже при  $V=20\text{м/с}$ ), але при коректній обробці (з широкою смугою фільтра) виміряне значення висоти по центру тяжкості двогорбої спектра буде завжди ближче до істинного в порівнянні з НЛЧМ.

На рисунку при зльоті ЛА разом зі зміщенням йде зворотне стиснення або розширення спектра для першої і другої відповідних половин зображеного для СЛЧМ періоду модуляції (Рис. 1.12).

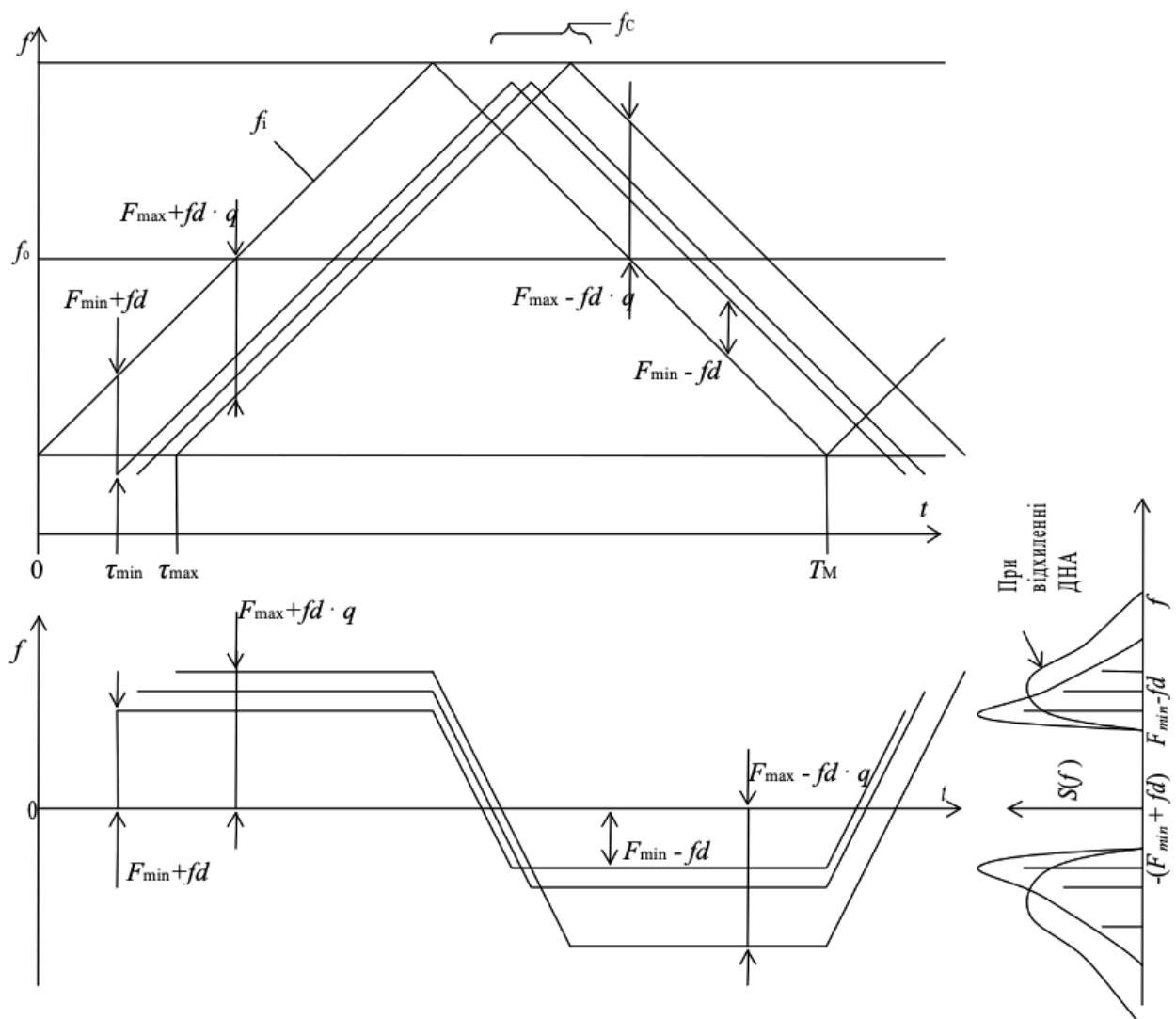


Рис. 1.12 Принцип формування відповідних гармонік і форми обвідного спектру сигналу биття при СЛЧМ при зльоті ЛА

При наявності горизонтальної швидкості для кожної зони відображення від поверхні також з'являється доплерівське зрушення, яке зміщує окремі графіки  $f_c$  і спектри в сторону відповідну напрямками вектора швидкості і знаку зміни несучої частоти. Але тут для кожного кільця дальності зрушення  $fd$  буде ще залежати і від напрямку вектора швидкості ЛА.

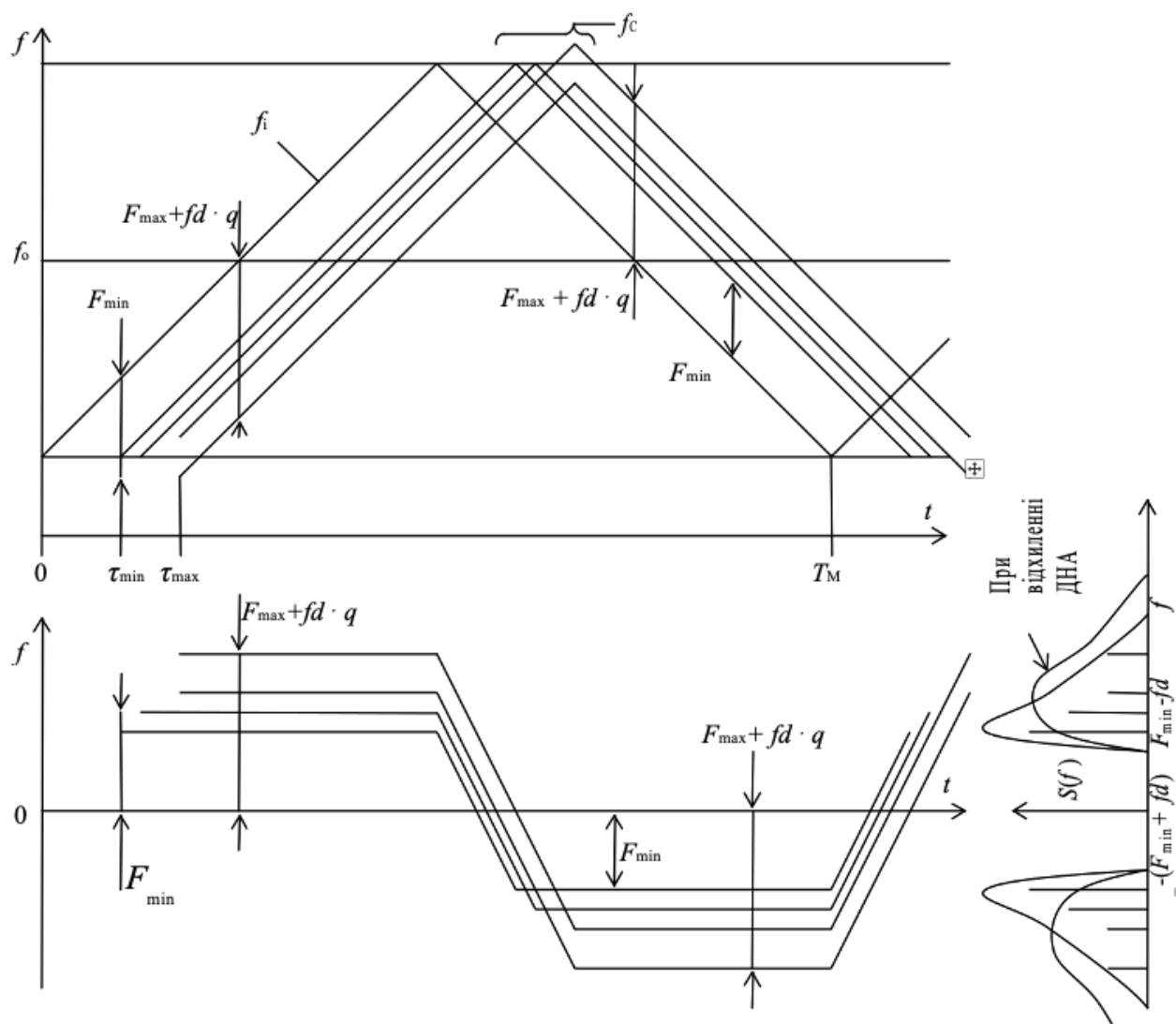


Рис. 1.13 Принцип формування відповідних гармонік і форми обвідного спектру сигналу биття при СЛЧМ при горизонтальному русі ЛА

На рисунку відображений принцип формування спектральних складових сигналу при горизонтальному русі ЛА (Рис. 1.13), при цьому умовно для перших двох зон поблизу нормалі зрушення  $fd$  не показаний, так як для першої

він дійсно нульовий, а для подальших поступово збільшується пропорційно  $q = \{1 - \cos(\gamma)\}$ , де  $\gamma$  - кут між напрямками польоту і візування. Для далекої зони фактичний доплерівське зрушення в напрямку польоту буде  $fd \cdot q$  зі знаком плюс, а в протилежному напрямку  $fd \cdot q$  зі знаком мінус, для інших проміжних напрямків зміщення в отриманому діапазоні  $\{-fd \cdot q \dots +fd \cdot q\}$ , тобто спектральні складові для кілець далеких зон «розширюються». Тому на малюнку для кільця з затримкою відповідної  $\tau_{max}$  умовно зображено два графіка  $f_c$  зі зсувами  $\pm fd \cdot q$ . Підсумковий ефект при цьому: при горизонтальному русі ЛА йде розширення спектра і для першої і для другої половин зображеного для СЛЧМ періоду модуляції.

Збільшення величини  $fd$  поступово призводить до такого «роздвоєння» гармонік спектру кілець, що частина сигналів відповідних середніх і далеких зон виявляється лівіше переднього фронту спектра:  $F_i - fd \cdot q < F_{min}$ . Для типових параметрів серійних вертолітних РВ ефект зміщення переднього фронту вліво спостерігається у же при  $V_x = 30$  м/с.

На практиці для реальних рівних і нерівних поверхонь дійсний розподіл енергії в спектрі залежить також від виду підстильної поверхні, особливості якої можна лише приблизно задати, описавши «середню» форму ДЗР поверхні [6].

В [18] наводяться результати експериментальних досліджень спектрів преутвореного сигналу при ЧМ випромінюванні для різних видів поверхонь. Для нестационарних і неоднорідних поверхонь (лісисті і скелясті гори, населені пункти) спектр перетвореного сигналу різко асиметричний і завжди багатогорбий, що пояснює ефективне відображення хвиль не тільки по нормалі до поверхні, але і від ділянок поверхні з різними похилими дальностями. Часті випадки, коли перший максимум спектра менше наступних. У містах основна відображення походить від дахів будинків, які можна розглядати як незалежні «дзеркальні» відбивачі з різними кутами нахилу. Нижче наведено спектр від

невеликого міста, що виділяється його особливістю - більш плоскою вершиною максимуму обвідної (Рис. 1.14). Отже, ми розглянули основні причини спотворень спектру.

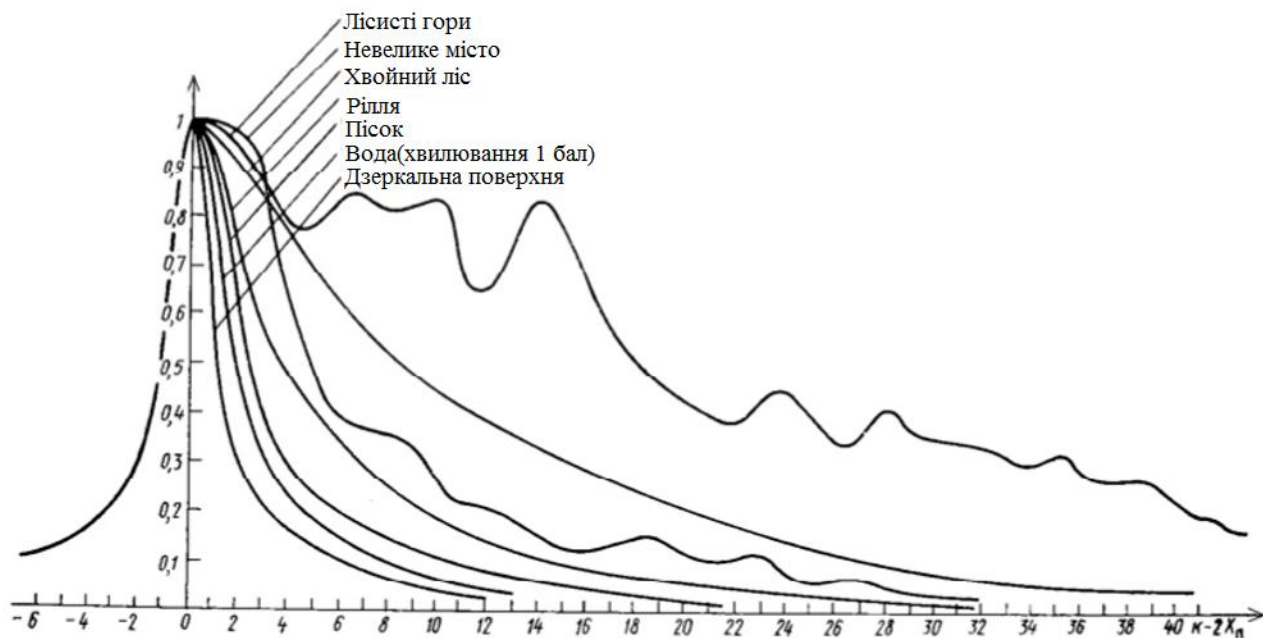


Рис. 1.14 Експериментальні значення обвідного спектра сигналу биття при горизонтальному польоті і вертикальному зондуванні, закон модуляції СЛЧМ



## 2. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХОНЬ.

В даному розділі будуть розглянуті загальні принципи і підходи до математичного моделювання поверхонь. Наведено короткий огляд теоретичних відомостей з існуючих літературних джерел, описані види моделей поверхонь. Потім наведені дані про види лісів Росії і описані варіанти моделювання такого типу поверхонь засобами MatLAB і з застосуванням тривимірної графіки.

### 2.1 Модель відображення радіохвиль від випадкових поверхонь з довільної шорсткістю.

Зазвичай статистичні характеристики складових сигналу, відбитого від випадково шорсткою поверхні, будуються за умови, що нерівності є пологими і кут візування близький до вертикалі [13]. При ковзних кутах, коли одні ділянки поверхні будуть затінювати іншими, існуючі рішення не можуть бути використані. Ці обмеження властиві самому методу, і суворе рішення задачі відображення від шорсткою поверхні з довільними радіусами кривизни її ділянок до сих пір ніхто не почув.

Визначення необхідних характеристик в таких випадках зазвичай виробляють експериментальним шляхом, причому часто експеримент проводиться для вирішення якої-небудь приватної завдання. Експерименти повторюються при зміні діапазону хвиль, кутів візування, іноді просто при створенні нового пристрою. В результаті виходять уривчасті дані, можливості застосування яких обмежена.

Внаслідок цього до визначення характеристик відбиття від поверхні з довільної шорсткістю доцільно підходити наступним чином:

Кафедра авіоніки					НАУ 19 07 83 000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХОНЬ	Літ.	Арк.	Аркушів	
Виконав		Піскульов В. А.							
Керівник		Слободян А.П.					33		
Консульт.		Слободян А.П.				173 Авіоніка			
Н. Контр.		Левківський В.В.							
Заф.каф..		Павлова С.В.							

експериментальним шляхом визначити параметри відображення при якихось певних умовах (при заданих кутах візування, при декількох довжинах хвиль і т. п.), після чого синтезувати модель поверхні, підбираючи штучно таку її структуру, щоб з одного боку, розрахунок відбитого від неї поля був порівняно простий, а з іншого боку, розраховані характеристики були досить близькі до отриманим експериментально. Така модель іноді називається феноменологічним, тобто зберігає картину явища.

Якщо модель підібрана таким чином, що вона добре пояснює характеристики відображення для деяких крайніх випадків, то можна припустити, що буде справедлива і для проміжних. Це, звичайно, буде тільки тоді, коли в основу моделі покладено реальні фізичні принципи.

В якості моделі протяжної мети або шорсткою поверхні в радіолокації зазвичай використовується сукупність елементарних відбивачів, розміщених на поверхні цілі, або сукупність елементарних ділянок (фацетів), що складають її поверхні. У такому вигляді ця модель охоплює і поверхні, вкриті лісовою рослинністю, оскільки елементи останньої можна також представити у вигляді елементарних відбивачів.

Фізичним обґрунтуванням моделі як сукупності безлічі елементарних відбивачів є принцип Гюйгенса - Кірхгофа, за яким кожна точка простору, в яку приходить електромагнітна хвиля, може розглядатися як джерело вторинної сферичної хвилі.

На властивості елементарних відбивачів накладаються наступні обмеження.

По-перше, передбачається, що сигнал, отриманий від одного елементарного відбивача (фацета), не залежить від сигналів, що приходять від інших відбивачів. Іноді накладаються умови, що визначають взаємний вплив елементарних відбивачів, однак при істотному ускладненні моделі це не дає відчутних результатів. Зроблене припущення дозволяє обійти основну важкість рішення методами електродинаміки - облік взаємовпливу елементів поверхні.

Другим припущенням є те, що кількість елементів (відбивачів), що утворюють мета (поверхню), має бути велике, а відображають властивості цих елементів приблизно однакові. Передбачається, що елементи, що дають відбитий сигнал, величина якого може бути близька до сумарного сигналу, відсутні. Це припущення цілком обґрунтовано, особливо для поверхонь з однорідними елементами. Форма і вид елементарних відбивачів можуть вибиратися практично довільно, що дозволяє привести і в відповідність характеристики моделі і дані експериментального дослідження. Як елементарних відбивачів використовуються кутові відбивачі, диполі, диски, кулі, і т. п. Їх розміри, форма визначають діаграму розсіювання енергії опромінення, що падає на даний відбивач.

Одним з основних припущень є апіорне визначення закону розподілу фаз сигналів, отриманих від елементарних відбивачів. Фаза сигналу від елементарного відбивача може бути записана у вигляді:

$$\varphi_E = \varphi_K + \varphi_P + \varphi_{OTR} \quad (2.1)$$

Де  $\varphi_K$  - фазовий зсув за рахунок часу поширення радіохвилі до елементарного відбивача і назад,  $\varphi_P$  - зрушення фаз за рахунок зміни умов поширення,  $\varphi_{OTR}$  - зрушення фаз при відображенні від елементарного відбивача.

Фазовий зсув  $\varphi_P$  називається неоднорідністю структури іоносфери і тропосфери і є випадковою величиною. Його середньоквадратичне значення при несприятливих метеорологічних умовах може доходити до одиниць радіан. При нормальних умовах для діапазонів метрових, дециметрових і сантиметрових хвиль воно становить порівняно невелику величину.

Зрушення фаз при відображенні  $\varphi_{OTR}$  може змінюватися в межах  $(0 - 2\pi)$  в залежно від електричних властивостей відбиваючого елемента, його розмірів і кута падіння відбиває хвилі.

Оскільки результуюче фазове зрушення є сумою декількох незалежних складових, то припущення про нормальний закон розподілу фази, по-видимому, найближче до дійсності.

В той же час для практичних цілей бажано використовувати рівномірний закон розподілу фаз в межах  $(0 - n2\pi)$  ( де  $n$  - ціле число ), при якому найбільш просто визначаються статистичні характеристики сигналів.

Слід зазначити, що по суті розглядаємого питання ці закони мають певну схожість: в обох випадках незначні відхилення мають велику ймовірність, ніж великі. Математичні очікування  $\cos\varphi$  і  $\sin\varphi$  дорівнюють нулю при нормальному законі, тобто при  $n > 3$ .

При рівномірному законі розподілу тиску фаз характеристики гармонійних функцій фази не змінюються, якщо змінити межі  $(0 - n2\pi)$  на  $(0 - 2\pi)$  або на  $((-\pi - +\pi))$ .

Останні припущення як найбільш зручні використовуються для апіорного закону розподілу фаз елементарних відбивачів.

Таким чином, модель відбиває являє собою сукупність великої кількості однорідних елементарних відбивачів, що дають відбиті сигнали з випадковими, незалежними і рівномірно розподіленими в інтервалі  $(0 - 2\pi)$  фазами.

Взагалі кажучи, облік тільки форми поверхні, що відбиває недостатній. Він може охарактеризувати лише досить обмежене коло поверхонь однорідного середовища, таких, як морська поверхня при невеликому хвилюванні, пустеля і т. д. У більшості природних поверхностей поряд з шорсткістю можуть мати місце зміни електричних властивостей середовища, наявність різнорідних шарів, присутність елементів рослинності і т. д. Все це істотно ускладнює картину відображення.

Однак вищезазначені особливості відбиваючої поверхні призводять в результаті до зміни амплітуди і фази поля, відбитого від елементарних ділянок поверхні. Приблизно такого ж зміни амплітуди і фази можна досягти і за допомогою зміни форми поверхні. Фазу відбитого сигналу можна підібрати,

наприклад, за допомогою зміни висоти елементарної ділянки над середньою поверхнею, амплітуду - за допомогою кривизни (нахилу) ділянки. Така компенсація можлива тільки в обмеженому діапазоні кутів падіння опромінюючої хвилі. Дуже ефективною вона може бути для кутів візування, близьких до вертикалі, оскільки в цьому випадку різниця ходу, а отже, і компенсуючий фазовий зсув залишаються майже незмінними при зміні кута.

Таким чином, природну поверхню зі змінними електричними параметрами можна замінити деякою ефективною шорсткою поверхнею з постійною питомою ефективною площею відображення  $\sigma_0$ , відображення від якої буде практично збігатися з відбитим від природної. Тоді для характеристики поверхні буде достатньо середньої комплексної діелектричної проникності і параметрів ефективною шорсткості [13].

## **2.2 Моделі опису поверхонь.**

*Електродинамічна модель.* Теорії розсіювання нерівною поверхнею, засновані на використанні принципу Кірхгофа -Гюйгенса, розроблені до теперішнього часу найбільш детально. Сутність наближення Кірхгофа полягає в тому, що струм, поточний в кожній точці реальної викривленою (нерівній) поверхні, буде таким же, як і струм, який протікав би з тієї ж поверхні, якби вона була плоскою і дотичній до реальної. Це наближення дозволяє розглядати поле, розсіяне нерівною поверхнею, виходячи з припущення, що струм, поточний по різних ділянках нерівній (ступінчастою) плоскій поверхні, має таку ж величину, як якщо б поверхня була гладкою, але має різні фази, які визначаються відмінністю відстаней окремих точок поверхні від середнього її рівня. Цей метод, незважаючи на гадану суворість, має ряд серйозних обмежень (нескінченність опроміненої поверхні, відсутність обліку руху випромінювача та ін.), ускладнюють безпосереднє використання результатів в аналізі радіосистем [4].

*Феноменологічна модель.* Численні різновиди методу феноменологічного моделювання є більш перспективними і дозволяють врахувати ряд важливих факторів в процесі аналізу, наприклад: ДЗР поверхні, флуктуацію окремих ділянок поверхні, що відбиває та ін. Суть методу феноменологічного моделювання зводиться зазвичай до математичного завданням відбитого сигналу у вигляді сукупності великої кількості парціальних сигналів з введенням ряду статистичних параметрів, що характеризують фізичні властивості шорсткою поверхні.

Перевірка «відповідності» тієї чи іншої моделі реальному сигналу проводиться зазвичай в експериментальних умовах, де кінцеве рішення досліджується з якісної і кількісної сторони. При цьому часто вдається встановити кількісні значення введених при моделюванні статистичних параметрів для різних типів реальних поверхонь, що відбивають.

Для дослідження бортових РЛС, працюючих по протяжній (земній) поверхні, можливі два типи феноменологічних моделей.

Згідно з першою (безперервна модель), що відображає поверхню замінюється сукупністю незалежних відбивачів, розміри яких значно перевищують довжину хвилі. Кожному відбивачу, опромінену під азимутним кутом  $\phi$  і кутом піднесення  $\theta$  приводиться у відповідність (в силу руху випромінювача) ділянку доплерівського спектра  $df(\theta, \phi)$  з щільністю потужності в одиниці тілесного кута  $P(\theta, \phi)$ . Інтегруючи по всіх опромінених антенних променем поверхнях, можна знайти результуючий спектр та інші статистичні характеристики відбитого сигналу. При цьому важливо правильно поставити енергетичний спектр парціального сигналу, який би враховував тимчасові характеристики випромінюваного сигналу, а також трансформації в спектрі при відображенні.

Інша модель (імпульсна) вважає, що при опроміненні поверхні, що відбиває променем кінцевої ширини в зону опромінення при русі об'єкта потрапляють все нові і нові ділянки поверхні. При цьому кожен фіксований

відбивач дає імпульс зі змінною частотою заповнення, обвідна якого визначена діаграмою спрямованості антени і ДЗР поверхні. Інтегруючи по всьому імпульсу можна також визначити статистичні характеристики сумарного відбитого сигналу.

Для побудови моделі використовуємо феноменологічну імпульсну модель відображення сигналу від протяжної поверхні, так як при її побудові не вимагається знання ділянки доплерівського спектра і щільності потужності для кожного відбивача.

При користуванні феноменологічної моделі відображення підстилаюча поверхня розбивається на окремі елементи (фацет, елементарні відбивачі), лінійні розміри яких покладається багато більше довжини хвилі, але багато менше відстаней до передавальної і приймальної антен. При виконанні цих умов і поєднаної приймально-передавальної антени відображення сигналу від фацета описується так само, як відображення від точкової мети з ефективною поверхнею розсіювання.

При створенні моделі сигналу будемо враховувати, що відображення відбувається із елементарних майданчиків, а шуканий сигнал ДЗРівнює сумі сигналів, відбитих від цих майданчиків. Причому квадратурні складові сигналу відбитого від елементарних поверхностей розподілені по нормальному закону з нульовим середнім [7].

### **2.3 Відображення від земної поверхні.**

Відображення від земної поверхні характеризується  $\sigma_0$  –диференціальної ЕПР або коефіцієнтом розсіювання [7]. Дискретні цілі характеризуються повною ефективною площею розсіювання  $\sigma$ . Покладається, що фази елементарних сигналів незалежні. Внаслідок цього, при розрахунку середньої потужності відбитого від землі сигналу можна підсумувати сигнали, відбиті окремими елементами (фацетом). Якщо це не виконується, то параметр диференціальної ЕПР втрачає сенс, такий випадок можливий при наявності

більшості різнорідних відбивачів, тобто в разі дуже високої роздільної здатності радіолокатора.

По-перше, на відбитий сигнал впливає ДНА, тобто неоднакова потужність в межах розкриття антени.

По-друге, великий вплив робить ДЗР, яка представляє залежність диференціальної ЕПР від кута на елементарну площадку.

Земну поверхню описати значно важче, ніж морську, хоча навіть морська поверхня практично не піддається адекватному математичному опису.

Роль теорії зводиться до адекватної інтерпретації результатів експериментів і виявлення закономірностей.

На сьогоднішній день не існує скільки - небудь однозначних експериментів по відбиваючим властивостями земної поверхні, не дивлячись на великий обсяг таких. Справа в тому, що експерименти або проводилися в дуже специфічних умовах, або ж навпаки, не містять точних параметрів, при яких проводилися вимірювання, що не дає можливості їх узагальнити.

### **2.3.1 Параметри, що впливають на відображення від земної поверхні.**

Радіолокаційні відображення залежать як від параметрів радіолокаційної апаратури, так і від параметрів самої земної поверхні.

Довжина хвилі, яку випромінює потужність, розміри опромінюваного майданчика, напрямок опромінення, поляризація сигналу - залежать від параметрів апаратури.

Комплексна діелектрична проникність, ступінь шорсткості поверхні, неоднорідність поверхневого шару.

Хвилі різної довжини чутливі до різних елементів земної поверхні. Один з ефектів - ефект "головного напрямку". Тобто ефект, що полягає в тому, що з деяких напрямків спостерігається більш сильне відображення.

Інтенсивне відображення спостерігається від елементів з великою діелектричною проникністю. Правда, експериментально це явище встановити



досить важко. З'ясовано, що діелектрична проникність істотно залежить від вологості.

Також відомо, що хоч ліс і є більш нерівною поверхнею, ніж місто, але сформований відбитий сигнал від міської забудови структурований значно складніше неї, ніж сигнал від лісу, оскільки в місті спостерігаються чергування плоских ділянок з дзеркальним відображенням, а також менш рівномірна структура міста. Відображення від об'єктів лісового масиву є більш рівномірним в усіх напрямках.

Також слід враховувати, що радіохвилі можуть проникати на різну глибину перед відображенням, що вносить додаткові труднощі.

### **2.3.2 Теоретичні моделі земної поверхні і їх обмеження.**

Точних описів на сьогоднішній день не існує через труднощі однозначної ідентифікації численних умов відображення при високій точності, а також по-різному відображають властивості в залежності від довжини хвиль. Крім того, вкрай мале число поверхонь потрапляє під поняття однорідних. З цієї причини велика частина моделей використовує статистичні методи опису. Але навіть ці описи є надмірно спрощуваними.

**Модель Ламберта.** Суть моделі в тому, що сигнал пропорційний  $\cos^2 \theta$ , де  $\theta$  - кут падіння хвилі. Цей закон дійсно виконується для широкого класу поверхонь при середніх кутах падіння.

**Сферична модель відображення.** Суть моделі в тому, що сигнал представляється як сигнал від різних сфер розташованих на різних відстанях. Але більшість цілей має куди більш яскраво виражений характер зміни відображення.

**Комбінаційна модель закону Ламберта і дзеркального відображення.** Відповідно до дослідженнями, для сантиметрових хвиль, як найбільш уживаних в радіолокації, дуже мала ймовірність дзеркального відображення.

**Комбінаційна модель дзеркальних елементів, ізотропних ділянок і сферичних ділянок.** Але результати деяких експериментів суперечать отриманим в моделі результатами.

**Фацетні модель.** Методом, найбільш добре апроксимується відображення від неоднорідній поверхні, з'явився фацетний метод. Цей метод використовує особливості геометричної оптики. Але також працюють і відображення під різними кутами, що не узгоджуються з геометричною оптикою, це можливо завдяки впровадженню ДЗР і ДНА, вдало апроксимуючі ізотропні елементи.

**Удосконалена фацетна модель** (використання принципу Кірхгофа - Гюйгенса). Суть ідеї Кірхгофа - Гюйгенса в тому, що струм, поточний в кожній точці реально викривленою поверхні дотичний до поверхні. Важливим параметром, що впливає на відображають властивості підстильної поверхні, є функція автокореляції. Але, на жаль, її важко знайти так само для умовно одне рідних поверхонь, таких як морська поверхня. Автокореляційні функції підбирають експериментально, так щоб вони найкращим чином узгоджувалися з результатами вимірювань.

## **2.4 Фацетні модель підстильної поверхні.**

Дослідження механізмів розсіювання радіохвиль реальними поверхнями і об'єктами дозволяють зробити висновок про різноманіття математичних моделей, які можуть бути покладені в основу моделі імітації її відображених радіолокаційних сигналів [7].

Згідно феноменологічному підходу побудови моделі [19] підстилаючої поверхню можна представити у вигляді набору дискретних статистично незалежних фацетів. Далі можна побудувати модель відбитого сигналу а у вигляді суми елементарних сигналів, відбитих різними ділянками по поверхні. Розміри елементарних ділянок визначаються роздільною здатністю по висоті зондуючого сигналу, точністю моделювання. Вибір способу розбиття

підстильної поверхні на елементарні відбивачі і їх розмірів у загальному випадку є нетривіальним завданням і практично може бути виконаний тільки для конкретних типів зондуючих сигналів і їх параметрів.

Фацетні модель підстильної поверхні найбільш універсальні а для опису і моделювання випадкових і детермінованих, нестационарних поверхностей з наступних причин:

- модель добре досліджена, заснована на геометричній моделі поширення/ відображення радіохвиль, і тому показує адекватні, експериментально підтверджені результати при коректному завданні параметрів і кількості фацетів;
- практично довільний розмір модельованої поверхні, необхідна обчислювальна потужність майже постійна при обліку фацетів лише в області головної пелюстки ДНА;
- величину нерівностей підстильної поверхні можна задати, просто визначивши випадкові (з нормальним розподілом) висоти для кожного фацета, або для кожного фацета можна задати точне значення висоти, формуючи цим точно заданий рельєф водної поверхні чи міської забудови;
- для моделювання стаціонарних поверхонь фацети можна зробити незалежними, при цьому кількість фактично сумованих сигналів від фацетів можна регулювати, отримуючи сигнали з різною кількістю виділяються яскравих відбивачів;
- коефіцієнти відбиття від фацетів можуть бути взяті випадковими (з нормальним розподілом) або розраховані з урахуванням заданого типу підстильної поверхні і фактично одержуваного середнього розміру фацета;
- при необхідності модель може врахувати форму, ширин у ДЗР, різноспрямованість ДЗР елементів поверхні, нескладно додати заважають відображення і перешкоди заданого рівня;

- завдяки високій швидкодії ЕОМ кількість моделювань може бути великим, тобто можна отримувати усереднені значення досліджуваних характеристик моделі і алгоритмів;
- для підвищення якості моделювання при заданому рельєфі просто збільшується щільність фацетів (відбивачів) на моделюється поверхні землі або моря.

Таким чином, відбитий від статистично рівної поверхні сигнал ЧМ РВ є сумою відбитих від різних ділянок поверхні парціальних сигналів з різною далекомірною і доплерівською частотою з випадковою амплітудою і фазою.

Загальні недоліки Фацетні моделі:

- із- за квадратної сітки розташування фацетів неможливо отримати точну гладку форму спектру при обмеженій кількості фацетів навіть для спрощеної однорідної шорсткою поверхні без яскравих відбивачів;
- при розрахунку спектра сигналу биття кількість фацетів, які беруть участь в розрахунку області максимуму, невелике щодо кількості фацетів, що беруть участь в розрахунку хвоста спектра, тобто обчислювальні витрати не пропорційні і різні для різних областей спектра.

## **2.5 Методи математичного уявлення лісової поверхні.**

Коли розглядається яка-небудь реальна земна поверхня, ми бачимо безперервну поверхню, вона не має різких стрибків і перепадів (за винятком дуже рідкісних випадків, наприклад ущелині).

Описати таку поверхню математично вельми важко, хоча і можливо. Для цього можна взяти різні підходи. У будь-якому випадку, при сучасних обчислювальних потужностей, досить зручно використовувати фацетні моделі. Далі потрібно відповісти на питання, яким чином математично задати фацети для цієї моделі.

### 2.5.1 Моделювання фацетів за допомогою математичного пакета.

Найпростіший спосіб – описати необхідні параметри за допомогою математичного апарату. Для цього підійде будь – яких математичний пакет, наприклад, MatLAB. Головна перевага полягає в тому, що кожен фацет можна описати математично незалежно від інших.

Для створення деякої поверхні в MatLAB існує кілька готових функцій. Наприклад, функція `meshz (X, Y, Z)` будує графік поверхні у вигляді набору стовпців по заданих масивів даних  $X, Y, Z$  [1].

Нижче наведемо графік, який виходить в результаті виконання цієї функції (Рис. 2.1).

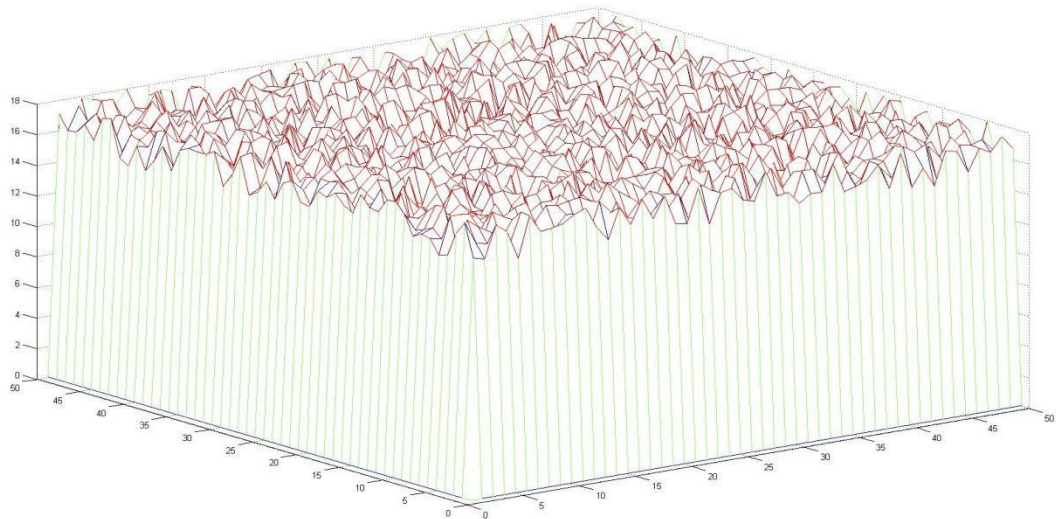


Рис. 2.1 Результат виконання функції `meshz` пакету MatLAB

Як видно, вийшла поверхня, яка має яскраво виражений, хоча і не дуже глибокий рельєф. Таку поверхню важко аналізувати. Значно зручніше будувати елементарні майданчики індивідуально, задаючи їм необхідні розміри, координати і положення в просторі.

Побудувати найпростішу площину. В якості вихідних даних поставимо вектор, нормальний до площини, що виходить із початку координат і деяку точку, яка буде належати площині. Крім того, обмежимо межі існування

площині по  $X$  і по  $Y$ . Нижче приведений результат побудови такої найпростішої площини (Рис. 2.2).

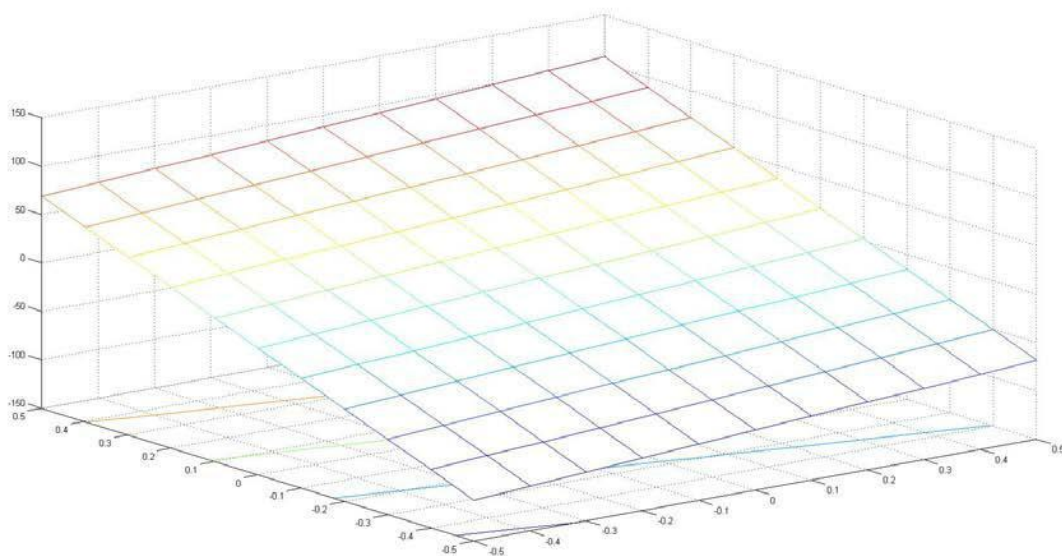


Рис. 2.2 Побудова однієї елементарної площадки по нормальному вектору і точці

Отже, з отриманого зображення видно, що деяка плоскість може бути повернута довільним чином, при цьому вона обов'язково проходить через задану точку (в даному випадку, ця точка є центром площини). Проекція цієї площини на площину  $XOY$  існує лише в заданих межах. У нашому випадку це про  $t = 0.5$  до  $0.5$  як по осі  $X$ , так і по осі  $Y$ .

Тепер уявімо безліч таких площин, всі «центральної точки» яких лежать на одній площині і є вузли нескінченної рівномірної сітки, а нормальні вектора для кожної площини задуються випадковим чином. Так, ми отримаємо безліч елементарних і ідентичних один одному майданчиків, кожна з яких повернута випадковим чином. Якщо в подальшому задати будь-які параметри, що характеризують властивості поверхні в плані відображення і поглинання радіохвиль, наприклад, ЕПР, ДЗР, то ми отримаємо безліч фацетів, це буде розглянуто пізніше. Нижче наведемо зображення отриманого графіка при різних кутах для кращого візуального сприйняття (Рис. 2.3, Рис. 2.4, Рис. 2.5).



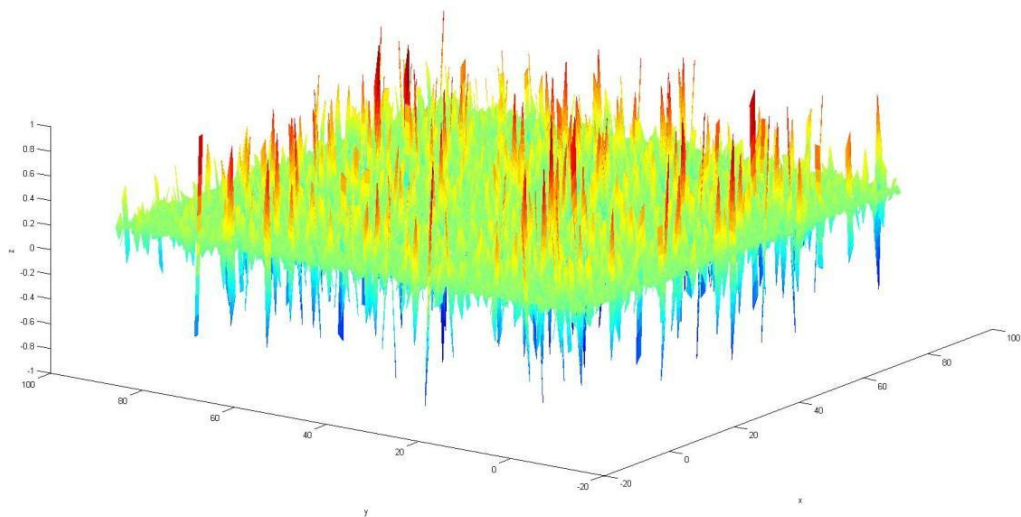


Рис. 2.3 Графічне представлення фацетної поверхні

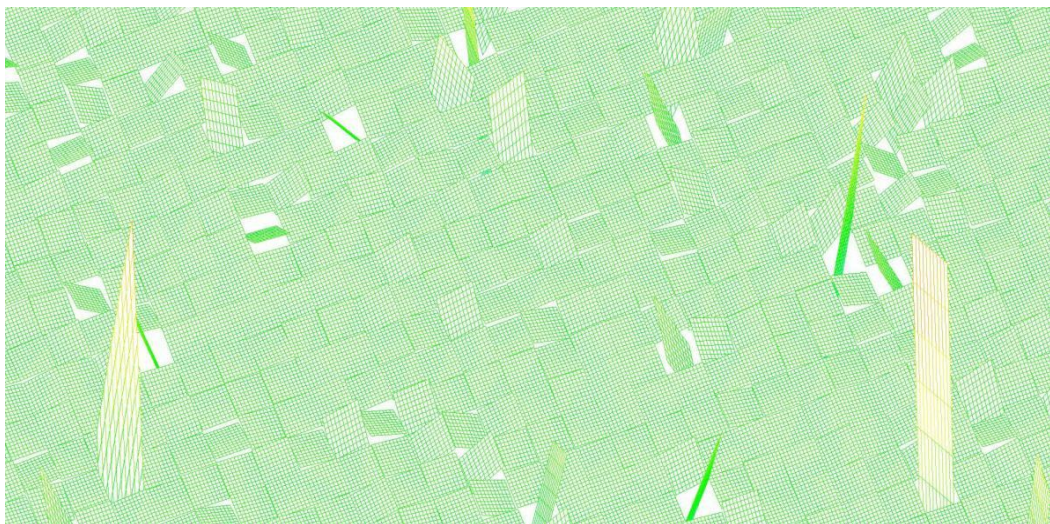


Рис. 2.4 Графічне представлення фацетної поверхні

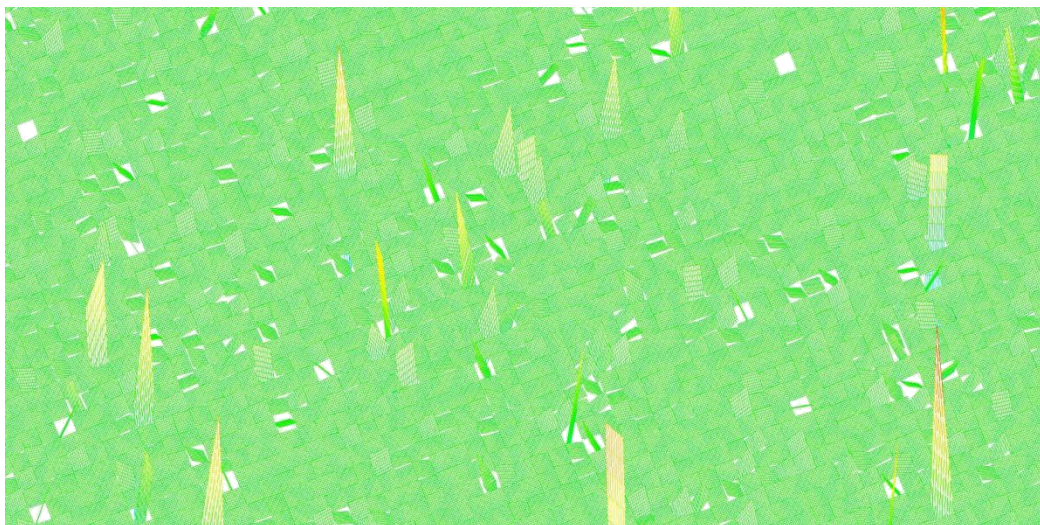


Рис. 2.5 Графічне представлення Фацетні по поверхні

Отримані малюнки дають наочне зображення математичної моделі, що моделює деяку негладку поверхню. Очевидно, що візуально ця модель далека від реальної поверхні, однак для математичної обробки радіолокаційних сигналів, відбитих від деякої поверхні, дана модель буде дуже зручна: ми отримали безліч елементів (елементарних майданчиків, фацетів) для кожного з яких ми можемо задавати індивідуальні параметри.

Далі перейдемо до більш детального дослідження лісової поверхні. Якщо взяти за основу сосновий ліс, то для нього можна прийняти наступні параметри. Ґрунт у такого лісу досить тверда і відносно рівна. Завдяки великій кількості опалого хвої в такому лісі мало підліску (втім, його може і не бути під все, цей варіант і приймемо до розгляду). Таким чином, приймемо в моді чи соснового лісу наступні умови. Шар ґрунту відносно рівний і без рослинності, потім йде проміжок по висоті ( близько 5 – 8 метрів ), в якому нічого немає (спростимо модель і будемо вважати, що стовбури дерев надають нехтує малий вплив на відбитий від поверхні сигнал), а далі протягом 17–20 метрів присутня деяка рослинність (крони дерев, гілки і т. п.).

Так, ми отримали примітивну двошарову модель поверхні. Нижче наведемо картинку, що ілюструють отриману модель ( Рис. Рис. 2.8).

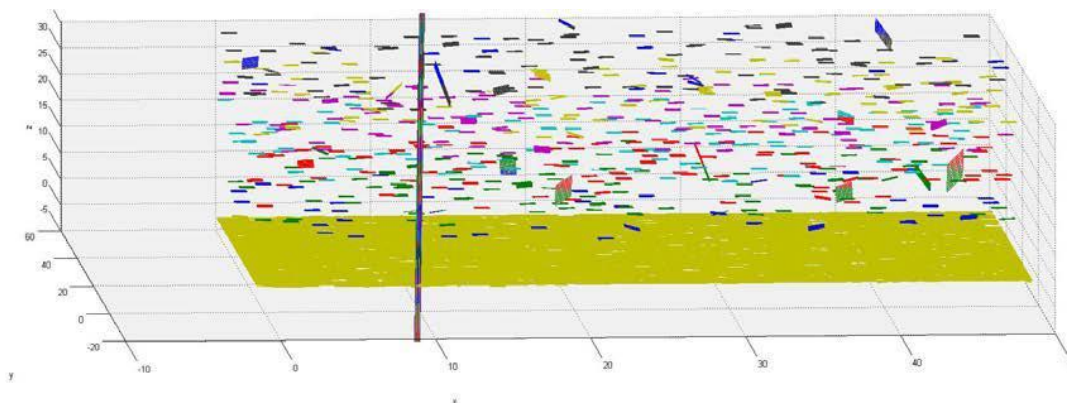


Рис. 2.6 Багатошарова Фацетні модель поверхні



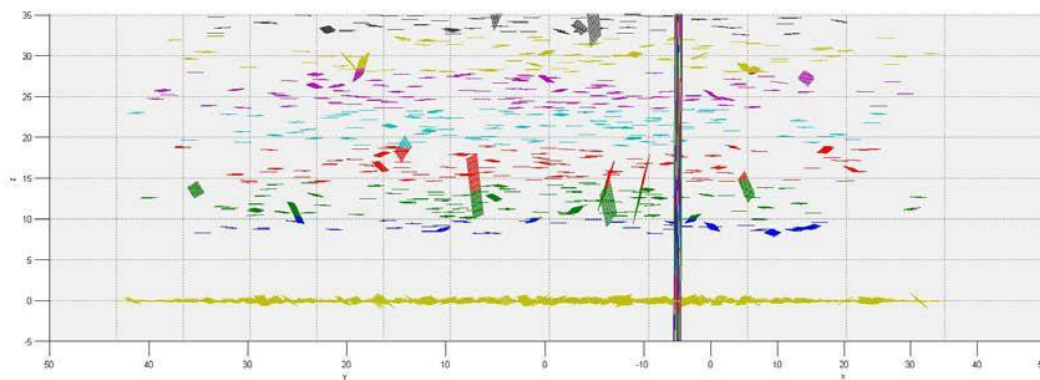


Рис. 2.7 Багатошарова фацетна модель поверхні

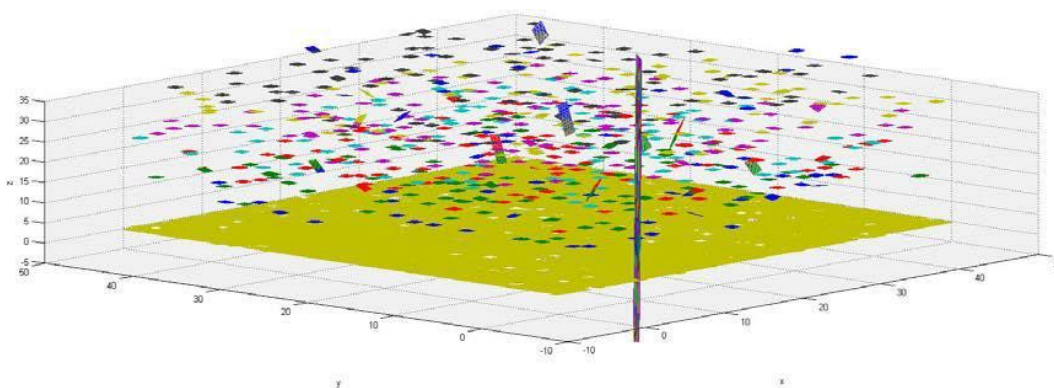


Рис. 2.8 Багатошарова фацетна модель поверхні

Отримані зображення показують, що нам вдалося створити примітивну математичну модель лісової поверхні, зручну з точки зору обробки радіолокаційних сигналів, випромінюваних в напрямку «зверху – вниз».

### 2.5.2 Моделювання фацетів за допомогою програми тривимірної візуалізації.

Розглянутий вище метод створення фацетів досить простий в реалізації з точки зору математики, але є сильно спрощеним з точки зору порівняння його з справжніми поверхнями. Сучасні програми дають нам широкі можливості. Для поліпшеної візуалізації можна спробувати створити тривимірну модель об'єкта (в нашому випадку – поверхні) в якій-небудь програмі тривимірної візуалізації (наприклад, в 3Ds MAX). Будь-який об'єкт тривимірної графіки можна представити у вигляді набору трикутників (полігонів) [20]. Якщо вирахувати

координати вершин цих трикутників, то далі можна за допомогою математичного пакету їх обробити і отримати весь необхідний набір даних для подальшої роботи з ними. Наведемо приклад, як виглядає поверхня з невеликим рельєфом, побудована в 3Ds MAX (Рис. 2.9). Ступінь рельєфу і величину фацетів можна регулювати, що дозволяє відтворити справжню поверхню з найбільшою точністю.

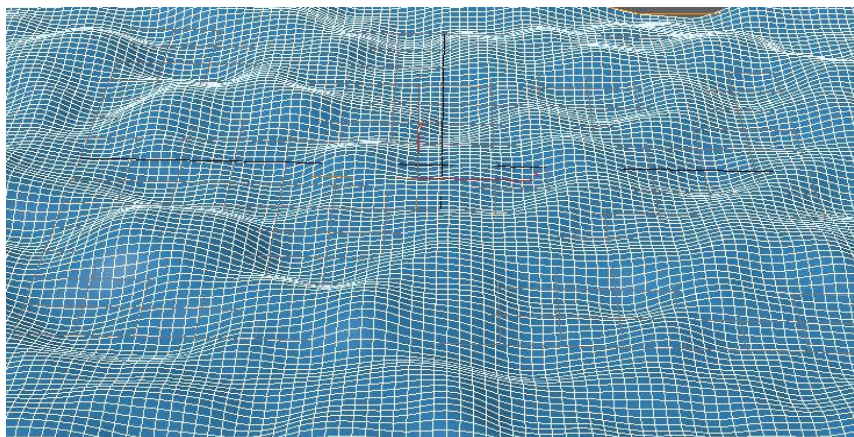


Рис. 2.9 Поверхня з невеликим рельєфом, побудована в 3Ds MAX

Далі розглянемо більш конкретний об'єкт. Оскільки найбільший інтерес для нас представляє ліс, то спочатку розглянемо приклад побудови одного дерева (Рис. 2.10).

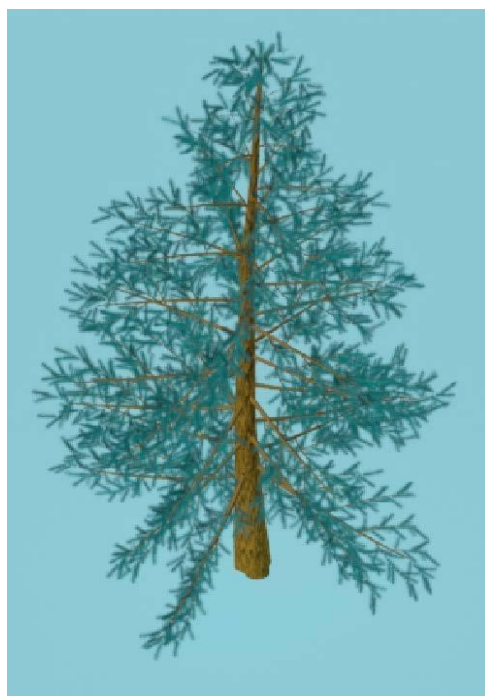


Рис. 2.10 Зображення дерева, створене за допомогою 3Ds MAX

Як видно, програма тривимірного моделювання дозволяє відтворити геометричний об'єкт з досить високою візуалізацією, яка передбачає наявність колосального обсягу полігонів на один предмет (в даному випадку – дерево), що обчислюється десятками тисяч штук. Очевидно, що для радіовисотомір така деталізація не потрібна, тому потрібно апроксимувати форму дерева, зберігши лише його габаритні е обриси (Рис. 2.11).

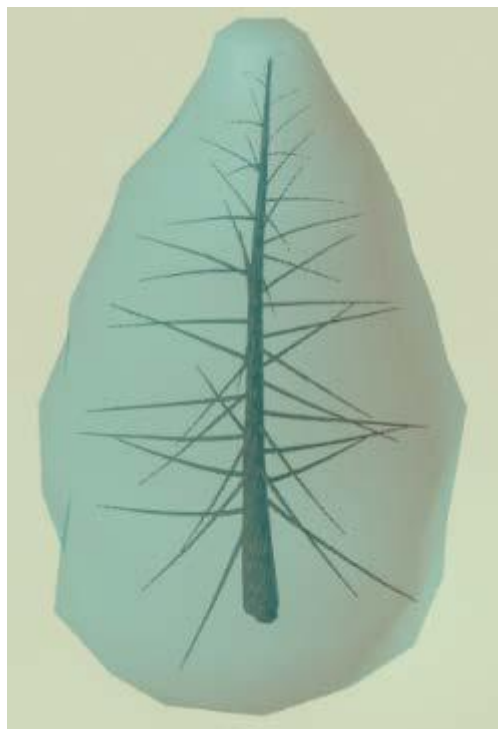


Рис. 2.11 Спрощена форма дерева, створена за допомогою 3Ds MAX

Такий варіант вже цілком придатний для подальшого моделювання в математичному пакеті, він містить адекватний обсяг полігонів (а для подальшої обробки – фацетів), який без проблем можна обробити за допомогою, наприклад, MatLAB.

### 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПЕКТРУ СИГНАЛА БИТТЯ РАДІОВИСОТОМІРУ З ЛЧМ.

В даному розділі буде розглянута математична модель спектру сигналу биття радіовисотоміру малих висот ( для вимірювання значень висоти від 10 до 1500 метрів ) з лінійною частотною модуляцією. Математична модель написана на мові MatLab, вдає із себе \*\*\*. М – файл і складається з трьох основних частин. Перша частина призначена для збору даних, тут задаються початкові параметри системи. Друга частина програми призначена для розрахунку параметрів фацетів: отримання масиву похилих дальності від ЛА до центру елементарної площадки (фацета), масиву потужності відбитого сигналу від кожної елементарної площадки. Остання частина програми присвячена розрахунку спектра сигналу биття на основі отриманого масиву похилих дальності і потужності, а також для побудови графіка.

#### 3.1 Вихідні параметри програми.

В самому початку виконання програми проводиться очищення пам'яті командою «clear all». Потім в пам'ять записуються вихідні дані. Нижче перерахуємо їх.

*Вихідна висота H.* В рамках даної моделі розглядається радіовисотомір малих висот. Таким чином, діапазон значень вихідної висоти: від 10 до 1500 метрів.

*Ширина діаграми спрямованості антени передавача DNA.* У сучасних радіовисотоміру ширина ДНА може змінюватися в незначних межах і становить близько 60 градусів за рівнем половинної потужності.

Кафедра авіоніки					НАУ 19 07 83 000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПЕКТРУ СИГНАЛА БИТТЯ РАДІОВИСОТОМІРУ З ЛЧМ	Лім.	Арк.	Аркушів
Виконав		Піскурьев В. А.						
Керівник.		Слободян А.П.					52	
Консульт.		Слободян А.П.				173 Авіоніка		
Н. Контр.		Левківський В.В.						
Заф.каф..		Павлова С.В.						

*Ширина діаграми зворотного розсіювання DOR.* Даний параметр може відрізнитися в залежності від типу підстильної поверхні і є однією з основних характеристик поверхні. DOR показує, як змінюється рівень відбитого від поверхні сигналу в залежності від кута падіння радіохвиль.

*Кут крену ЛА KREN.* Кут крену ЛА характеризує еволюцію літального апарату навколо поздовжньої осі (Рис. 3.1). Модель яка розробляється буде вірно функціонувати при значеннях кута крену до половини значення ДНА.

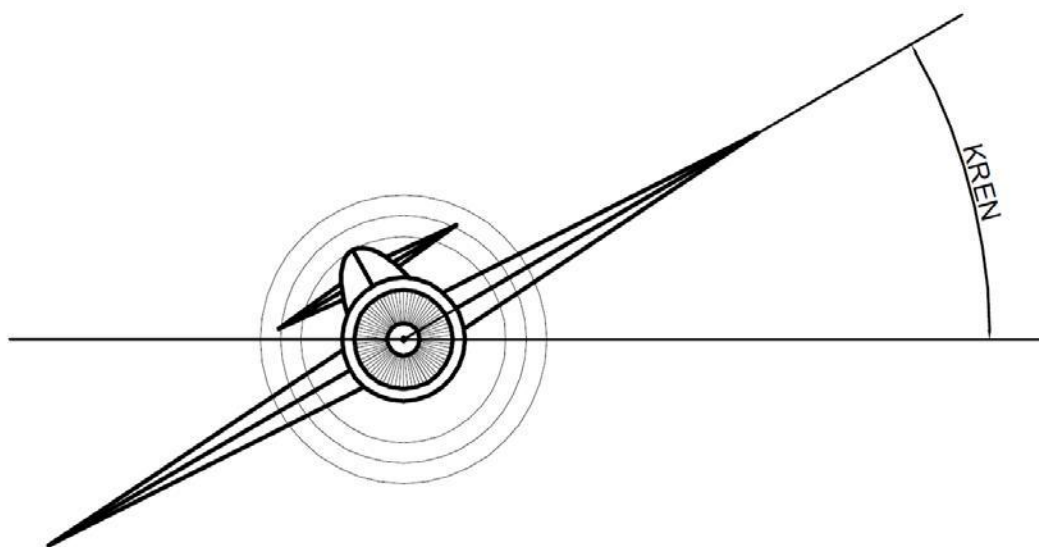


Рис. 3.1 Ілюстрація крену ЛА

*Кут тангажу ЛА TANG.* Кут тангажу ЛА характеризує еволюцію літального апарату навколо поперечної осі (Рис. 3.2). Розробляється модель буде вірно функціонувати при значеннях кута тангажу до половини значення ДНА.

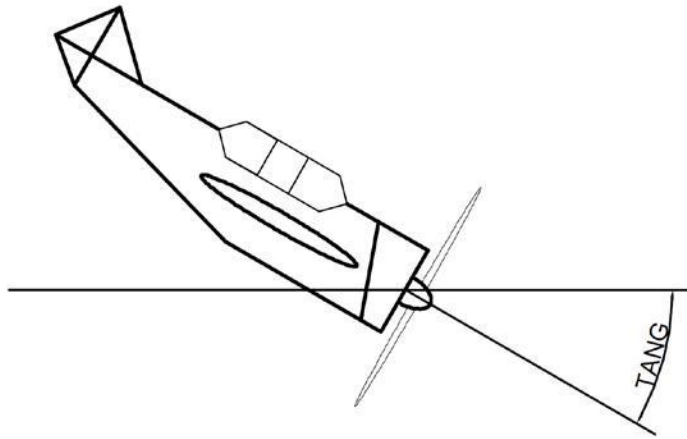


Рис. 3.2 Ілюстрація тангажу ЛА

Середньоквадратичне значення кута відхилення нормалі до площини фацета від вертикалі  $\alpha_{lp}$ . Даний кут характеризує ступінь відхилення площини фацета закон розподілу – нормальний (Рис. 3.3).

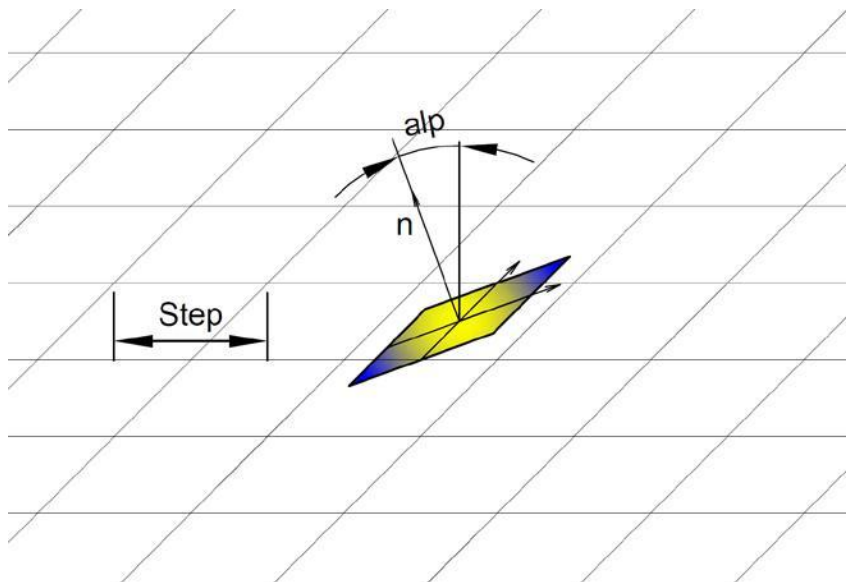


Рис. 3.3 Кут відхилення фацета

Робоча частота передавача  $F0$ . У даній математичної моделі мається на увазі, що значення даної частоти є мінімальним значенням частоти сигналу, випромінюваного передавачем радіовисотомір.

Період модуляції частоти ЛЧМ  $T0$ . Даний параметр розраховується виходячи з діапазону вимірюваних висот, ширини ДНА, допустимих кутів еволюції ЛА і інших параметрів польоту.



*Значення девіації частоти ЛЧМ  $dF$ .* Даний параметр може бути різним і зазвичай він ДЗРівнює близько 100... 200 МГц. У даній моделі вона ДЗРівнює 100 МГц.

*Вертикальна швидкість руху ЛА  $VV$ .* Даний параметр характеризує швидкість переміщення ЛА уздовж вертикальної лінії (зліт, посадка) і задається в метрах в секунду.

*Горизонтальна швидкість руху ЛА  $VH$ .* Даний параметр характеризує швидкість переміщення ЛА уздовж горизонтальної лінії і задається в метрах в секунду.

*Потужність передавача  $P0$ .* У Фацетні моделі значення даного параметра є лише відносною величиною, тому він заданий рівним 1.

*Коефіцієнт відображення для фацета  $Pi$ .* У даній моделі значення коефіцієнта відображення задається параметром релєєвського розподілу.

*Крок сітки фацетів  $step$ .* У проектованій моделі фацети мають форму квадрата. Параметр  $step$ , по суті своїй, задає величину сторони цього квадрата. Вибирати величину параметра  $step$  слід виходячи з поточної висоти польоту ЛА і вимог до кількості розраховуються фацетів. Чим менше параметр  $step$ , тим більше число фацетів буде розраховано і тим менша площа буде у цих фацетів.

*Крок побудови графіка спектра сигналу бумтя  $Hstep$ .* Даний параметр використовується при розрахунку спектра і по суті своїй характеризує крок по горизонтальній осі, з якими будуються точки на графіку. Вибір даного параметра дозволяє зробити графік більш-менш докладним і наочним.

*Вибір типу апроксимації ДЗР і ДНА  $varDNA$  і  $varDOR$ .* Ці параметри є лише ДЗРоговказом. В ході виконання програми значення параметра опитується і приймається, якою функцією апроксимувати ДЗР і ДНА.

### **3.2 Алгоритм розрахунку похилій дальності.**

Розрахунок масиву похилих дальностей необхідно виконувати в кілька етапів. Спочатку розраховуються параметри плями, що опромінюється

передавальною антеною ЛА, потім це пляма розбивається на елементарні площадки (фацет). Далі, виходячи з координат фацета, знаходиться геометрична дальність від ЛА до кожного з фацетів. Оскільки всі ці операції, за розробленим алгоритмом, виконуються всередині циклу, то тут же проводиться розрахунок відносної потужності відбитого сигналу, прийшов до приймача від кожного з фацетів, а також розраховується два масиви доплерівських частот: для вертикальної швидкості і горизонтальної (для кожного фацета).

### **3.2.1 Розрахунок параметрів плями, що освітлюється РВ на підстильній поверхні.**

При розробці математичної моделі сигналу биття радіовисотомір можна зробити ряд зневагою:

- діаграма спрямованості випромінює антени буде ідеальною, тобто не містить бічних пелюсток ;
- при нульових кутах крену і тангажу пляма, що освітлюється антеною радіовисотомір на земній поверхні, вдає із себе квадрат з центром в точці падіння нормалі від ЛА до поверхні ;
- при ненульових значеннях кутів крену і тангажу пляма, висвітлене антеною радіовисотомір на земній поверхні, вдає із себе прямокутник, отриманий шляхом розширення вихідного квадрата в одну або дві сторони в залежності від кутів еволюції ЛА (Рис. 3.4).

Припустимо, що літальний апарат в деякий момент часу робить деякі еволюції в просторі, які можна описати за допомогою кутів крену  $KREN$  і тангажу  $TANG$ . Знаючи два цих кута, а також значення вихідної висоти  $H$  і ширини  $DНА$ , ми можемо знайти розміри прямокутника, що освітлюється радіовисотоміром на земній поверхні.

У математичної моделі прийнято, що ЛА зорієнтований в просторі таким чином, що його поздовжня вісь паралельна осі  $X$  декартової системи



координат, поперечна вісь паралельна осі  $Y$  декартової системи координат, а вертикальна вісь збігається з віссю  $Z$  декартової системи координат.

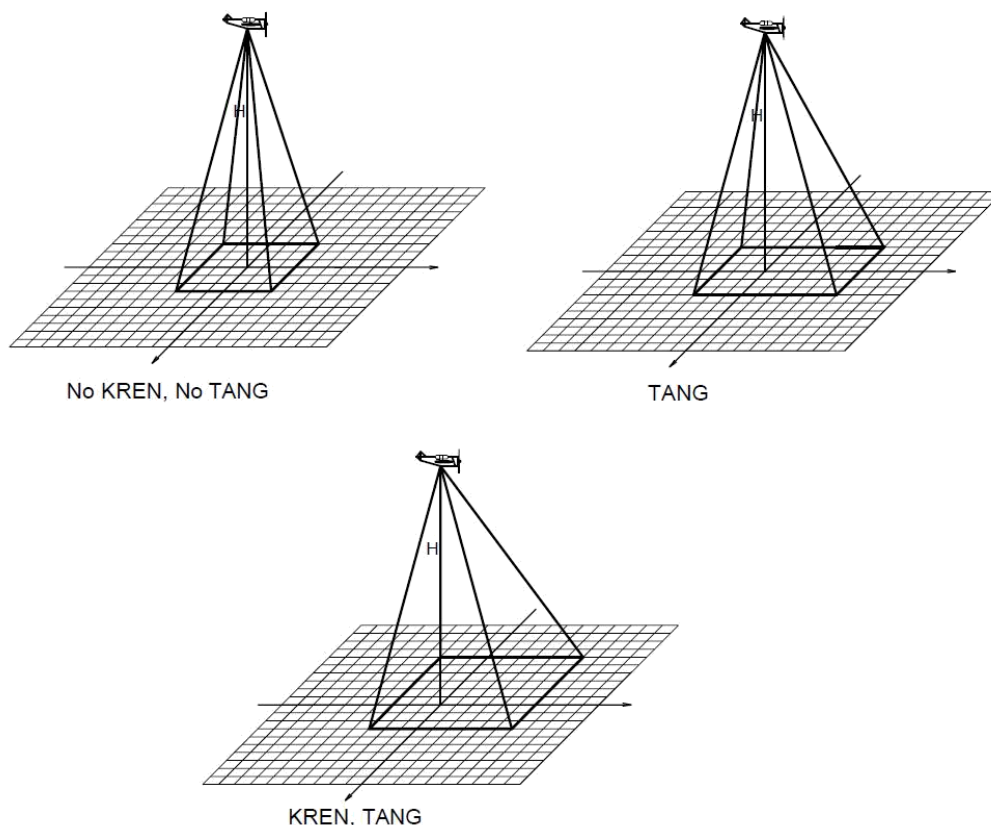


Рис. 3.4 Геометрія плями, що освітлюється РВ на підстильній поверхні

Таким чином, знаючи значення висоти  $H$  і кутів відхилення ЛА уздовж осей  $X$  і  $Y$  ( $TANG$ ,  $KREN$ ), а також, знаючи, що точка падіння нормалі від ЛА до підстильної поверхні лежить на початку координат, ми можемо знайти координати точки, що лежить в площині підстильної поверхні (площину  $OXY$ ), через яку проходить вісь діаграми спрямованості передавальної антени. Зробити це можна, ґрунтуючись на визначенні тангенса кута в прямокутному трикутнику, а саме: тангенс кута прямокутного трикутника дорівнює відношенню протилежного катета до прилеглого. Таким чином, можна знайти координати точки падіння осі ДНА на підстиляючої поверхню:

$$x_0 = H \cdot tg \left( \frac{TANG \cdot \pi}{180} \right), \quad (3.1)$$

$$y_0 = H \cdot tg \left( \frac{KREN \cdot \pi}{180} \right).$$

Слід зазначити, що MatLab вважає кути в радіанах, тому тут аргумент тангенса переведений в радіани.

Щоб знайти розміри квадрата з центром на початку координат (випадок, коли відсутні кути еволюції ЛА), потрібно скористатися аналогічними тригонометричними співвідношеннями:

$$\Delta x = H \cdot tg \left( \frac{DNA \cdot \pi}{180 \cdot 2} \right), \quad (3.1)$$

$$\Delta y = \Delta x$$

Тут параметри  $\Delta x$  і  $\Delta y$  характеризують модуль відстані, яке відсікається на координатних осях  $X$  і  $Y$  Кордонами квадрата з центром на початку координат (Рис. 3.5).

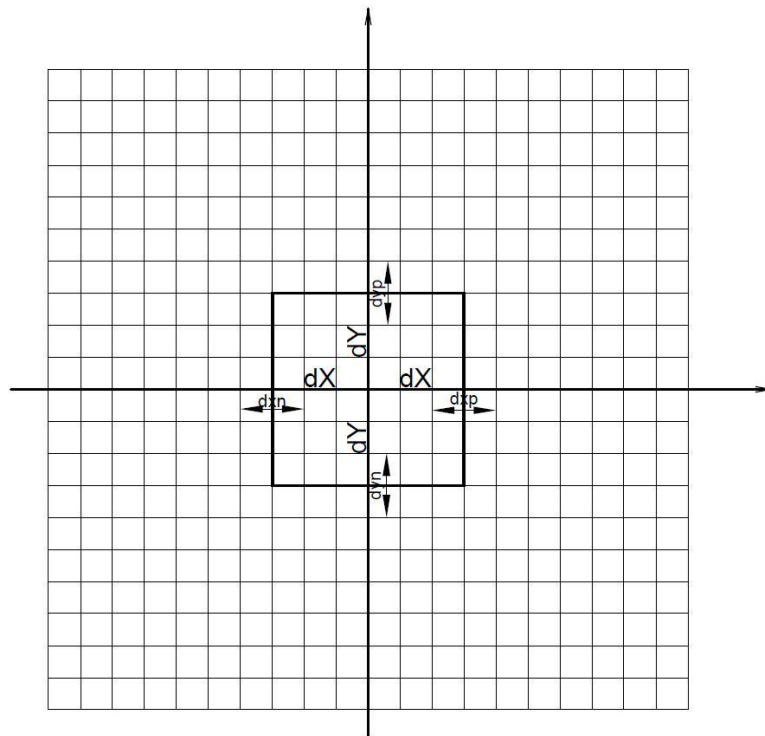


Рис. 3.5 Вид плями, що освітлюється РВ

У разі ненульових значень кутів крену і тангажу вихідний квадрат необхідно розширити шляхом зсуву однієї або двох граней квадрата ( виходить

уже прямокутник ). Параметри розширення визначаються значенням і знаком кутів еволюції ЛА (див. Рис. 3.6). Для визначення максимального кута відхилення лінії ЛА – підстилаючу поверхню, необхідно скласти відповідний кут еволюції ЛА (крен / тангаж) і половину ширини ДНА. Таким чином, ми зможемо знайти катет прямокутного трикутника. Надалі, межі прямокутника будуть задані чотирма відрізками, які відсікаються межами прямокутника на координатних осях. Так, нам необхідно знайти збільшення до нульових відрізках ( відсікає межами вихідного квадрата ). Спочатку знайдемо чисельні значення даних збільшень:

$$dx = H \cdot tg \left( \frac{|TANG| \cdot \pi}{180} + \frac{DNA \cdot \pi}{180 \cdot 2} \right) - \Delta x, \quad (3.3)$$

$$dy = H \cdot tg \left( \frac{|KREN| \cdot \pi}{180} + \frac{DNA \cdot \pi}{180 \cdot 2} \right) - \Delta y.$$

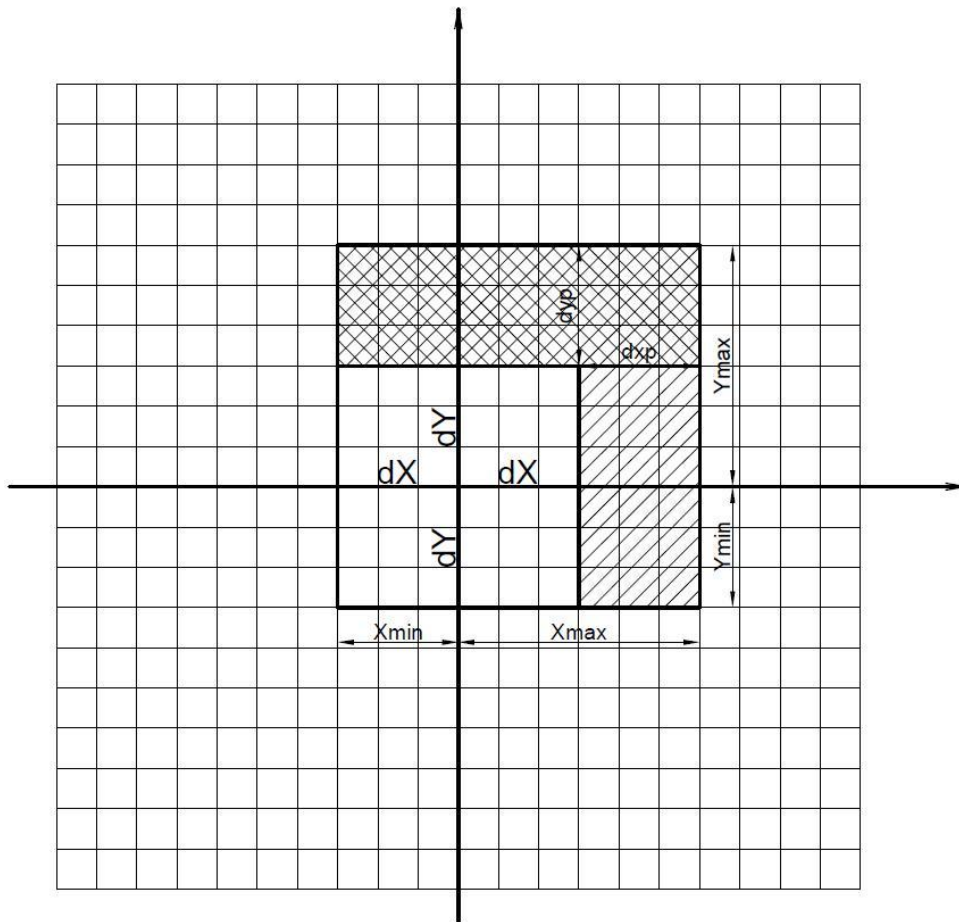


Рис. 3.6 Розширення плями, що опромінюється РВ, внаслідок еволюцій ЛА

Далі алгоритм програми аналізує знаки кутів крену і тангажу і вже задаються значення зсуву для кожної з граней вихідного квадрата.

Таким чином, ми знайшли всі необхідні параметри для завдання прямокутника - плями, що опромінюється передавальною антеною радіовисотомір на підстильній поверхні:

$$\begin{aligned} X_{min} &= -(\text{ceil}(\Delta x + dxn)) \cdot 10, \\ X_{max} &= (\text{ceil}(\Delta x + dxp)) \cdot 10, \\ Y_{min} &= -(\text{ceil}(\Delta y + dyn)) \cdot 10, \\ Y_{max} &= (\text{ceil}(\Delta y + dyp)) \cdot 10. \end{aligned} \quad (3.4)$$

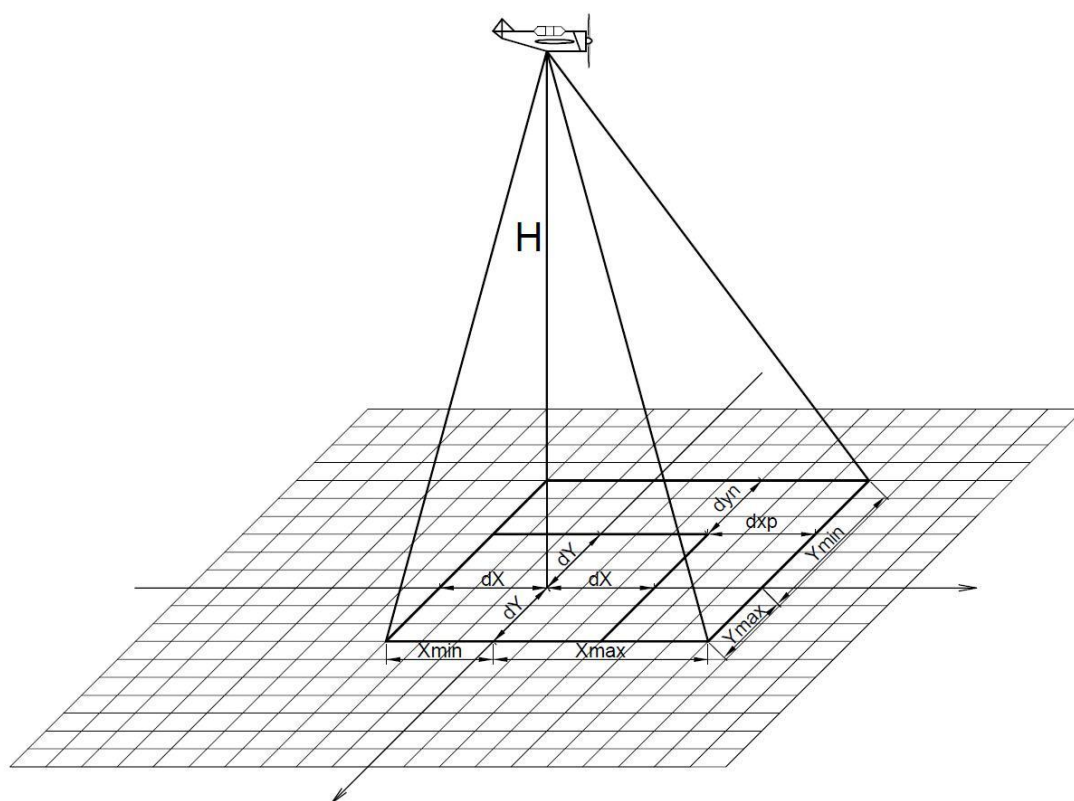


Рис. 3.7 Пляма, що освітлюється РВ, при наявності еволюцій ЛА

Отже, отримані параметри плями, що освітлюється РВ на підстильній поверхні (Рис. 3.7)

Тепер ми маємо всі необхідні параметри, щоб реалізувати цикл, в якому буде проводитися розрахунок масиву похилих дальностей.

### 3.3 Розрахунок параметрів фацетів.

Розрахунок параметрів фацетів проводиться за допомогою двох вкладених циклів. По суті, ми маємо двовимірний масив даних, який представляє з себе прямокутну майданчик на підстильній поверхні. Кожен елемент цього масиву характеризується двома координатами ( $x$ ,  $y$ ). Виходячи з двох координат, ми можемо геометрично розрахувати всі необхідні параметри.

На кожному новому кроці циклу проводиться розрахунок параметрів одного з фацетів. У даній моделі кожен фацет характеризується трьома параметрами: кут відхилення нормалі до площини фацета від вертикалі, фаза фацета (параметр показує, в який бік відхилений фацет) і коефіцієнт відображення. Перші два з цих параметрів задаються випадковим чином для кожного фацета.

У вихідних параметрах програми задається середньоквадратичне значення кута відхилення нормалі до площини фацета від вертикалі  $alp$ . Програма виконується так, що цей кут відхилення задається випадковим чином для кожного з фацетів за нормальним законом розподілу:

$$\alpha = |randn(1) \cdot alp| \cdot \frac{\pi}{180}. \quad (3.5)$$

Тут функція  $randn(n)$  формує масив розміру  $n \times n$ , елементами якого є випадкові величини, розподілені по нормальному закону з математичним очікуванням 0 і середньоквадратичним відхиленням 1. Отже, кут відхилення фацета  $\alpha$  розподілений нормально з математичним очікуванням 0 і середньоквадратичним відхиленням, рівним заданому параметру  $alp$ .

Другим параметром, що характеризує орієнтацію фацета в просторі є його фаза. У програмі це реалізовано так, що фацет може бути відхилений в будь-яку сторону. (Рис. 3.8). Фаза фацета, відповідно, розподілена рівномірно на інтервалі від 0 до  $2\pi$ :

$$\beta = rand(1) \cdot 2\pi. \quad (3.6)$$

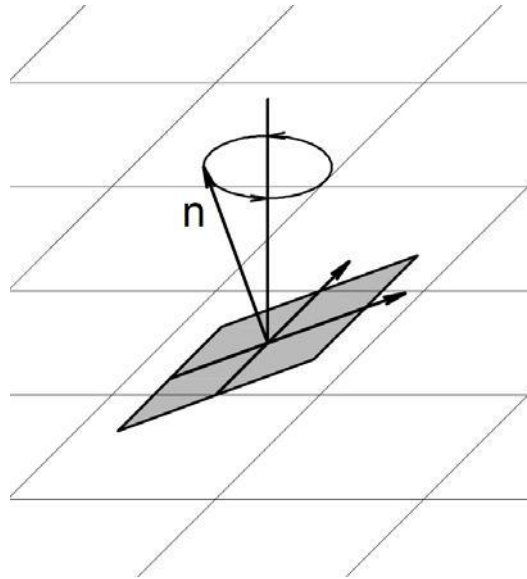


Рис. 3.8 Фаза фацета

Наступним етапом в розрахунку параметрів фацетів є визначення кутів:

- між лінією дальності (падаючий промінь від ЛА до ПП) і віссю ДЗР фацета ;
- між лінією дальності (падаючий промінь від ЛА до ПП) і віссю ДНА передавача.

Для того, щоб знайти кут між двома прямими лініями в просторі зручно використовувати напрямні вектори цих прямих, так як за кут між прямими можна прийняти кут між їх напрямними векторами. Наведемо опис цього механізму.

Нехай нам дано два вектора, кожен з яких заданий трьома координатами:

$$\vec{S}_1 = (m_1, n_1, p_1), \quad (3.7)$$

$$\vec{S}_2 = (m_2, n_2, p_2).$$

Тоді косинус кута між цими векторами можна знайти за такою формулою:

$$\cos \varphi = \frac{\vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2}{|\vec{S}_1| \cdot |\vec{S}_2|} = \frac{m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2} \cdot \sqrt{m_2^2 + n_2^2 + p_2^2}}. \quad (3.8)$$

Отже, нам потрібно знайти координати напрямних векторів для лінії дальності «ЛА - фацет», осей ДНА і ДЗР. Нормальний вектор до площини фацета можна вважати напрямним вектором осі ДЗР. Знайти цей вектор можна, виконавши ряд перетворень над вихідними даними фацетів (кут відхилення і фаза). В результаті перетворень отримаємо три координатних вектора:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{nx} &= \sin \alpha \cdot \cos \beta, \\ \overrightarrow{ny} &= \sin \alpha \cdot \sin \beta, \\ \overrightarrow{nz} &= \cos \alpha.\end{aligned}\quad (3.9)$$

Де кути  $\alpha$  і  $\beta$  для даного фацета розраховані за формулами (3.5) і (3.6).

Щоб знайти координати направляючого вектора лінії дальності «ЛА - фацет» можна використовувати вихідні дані для поточного фацета: вихідна висота  $H$  і координати центру фацета, які ДЗРівнюють поточним лічильнику циклу. Координати вектора задаються наступним чином:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{rx} &= -i, \\ \overrightarrow{ry} &= -j, \\ \overrightarrow{rz} &= H.\end{aligned}\quad (3.10)$$

Де  $i$  і  $j$  - лічильники двох циклів (один вкладений в інший), в яких перебираються елементи масиву фацетів. По суті своїй, ці два параметри задають координати центру фацета в площині ОХУ.

Координати вектора - це проекції даного вектора на всі координатні осі.

Щоб знайти координати направляючого вектора осі ДНА зручно використовувати раніше розраховані у формулі (3.1) координати центру прямокутника:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{ax} &= -x_0, \\ \overrightarrow{ay} &= -y_0, \\ \overrightarrow{az} &= H.\end{aligned}\quad (3.11)$$

Де  $x_0$  і  $y_0$  - координати центру прямокутника.

Наступним етапом потрібно знайти всі раніше зазначені кути за формулою (3.8). Кут між лінією дальності «ЛА - фацет» і віссю ДЗР знаходиться наступним чином:

$$\begin{aligned}\cos f_i &= \frac{nx \cdot rx + ny \cdot ry + nz \cdot rz}{\sqrt{nx^2 + ny^2 + nz^2} \cdot \sqrt{rx^2 + ry^2 + rz^2}}, \\ f_i &= \frac{180}{\pi} \arccos(\cos f_i).\end{aligned}\quad (3.12)$$

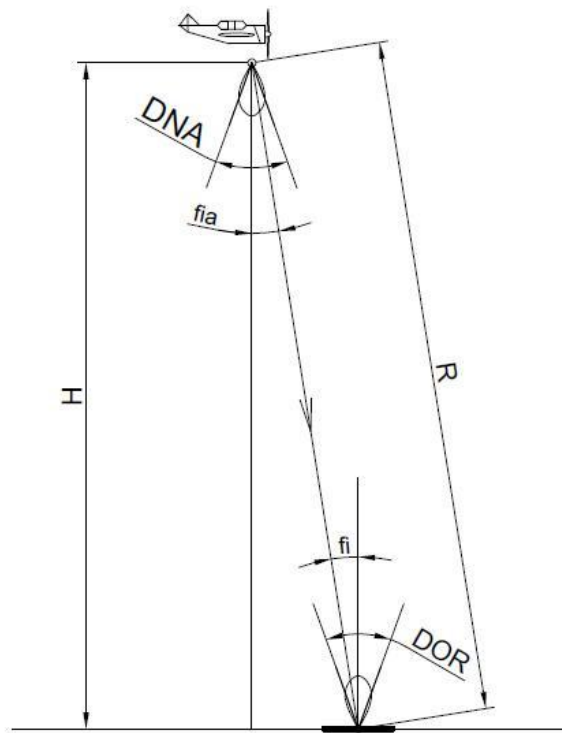


Рис. 3.9 Кути між лінією дальності і віссю ДНА, і між лінією дальності і віссю ДЗР

Кут між лінією дальності « ЛА – фацет » і віссю ДНА знаходиться наступним чином:

$$\cos fia = \frac{ax \cdot rx + ay \cdot ry + az \cdot rz}{\sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2} \cdot \sqrt{rx^2 + ry^2 + rz^2}}, \quad (3.13)$$

$$fia = \frac{180}{\pi} \arccos(\cos fia).$$

Тепер, коли розраховані всі кути, нам потрібно знайти геометричну дальність від ЛА до центру поточного фацета. Щоб це зробити, нам потрібно спочатку, знаючи координати центру фацета, розрахувати відстань L від початку координат до центру поточного фацета, а потім, знаючи відстань L і задану висоту, розрахувати шукане відстань  $R_0$ . Обидві ці величини знайдемо по теоремі Піфагора: квадрат гіпотенузи прямокутного трикутника ДЗРівнює сумі квадратів катетів(Рис. 3.10):



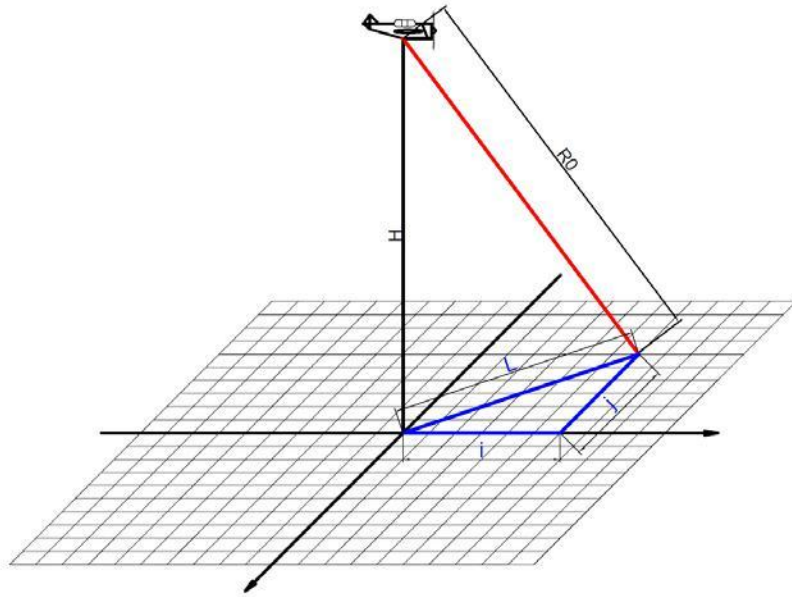


Рис. 3.10 Визначення похилій дальності

$$L = \sqrt{i^2 + j^2}, \quad (3.14)$$

$$R_0 = \sqrt{L^2 + H^2}.$$

Де  $i$  і  $j$  - лічильники двох циклів (один вкладений в інший), в яких перебираються елементи масиву фацетів, вони ж є координатами центру фацета.

Тепер можна продовжувати подальший розрахунок параметрів фацетів.

### 3.3.1 Вплив ефекту Допплера.

Як відомо, ефект Допплера полягає у зміні частоти прийнятих коливань при відносному русі приймача і передавача коливань (цей ефект був відкритий австрійським фізиком Крістіаном Допплера в 1842 г.). Зміна частоти тим більше, чим більше швидкість руху приймача відносно передавача. Такий же ефект має місце, якщо передавач і приймач нерухомі відносно один одного і знаходяться на об'єкті, що рухається, а коливання приймаються після відображення від нерухомого об'єкта.

Якщо джерело хвиль рухається щодо середовища, то відстань між гребенями хвиль (довжина хвилі  $\lambda$ ) залежить від швидкості і напрямку руху.

Якщо джерело рухається у напрямку до приймача, тобто наздоганяє що випускається їм хвилю, то довжина хвилі зменшується (швидкість при цьому має позитивне значення), якщо видаляється - довжина хвилі збільшується (швидкість має від'ємне значення). Формула для загального випадку має вигляд:

$$F = F_0 * \frac{\left(1 + \frac{V}{c}\right)}{\left(1 - \frac{V}{c}\right)}. \quad (3.15)$$

Тут  $F$  – значення частоти з урахуванням ефекту Допплера;  $F_0$  – значення вихідної частоти, випромінюваної джерелом;  $V$  – швидкість руху об'єкта;  $c$  – швидкість світла в середовищі.

Таким чином, стосовно до нашої моделі, доплерівський приріст частоти можна знайти за формулою:

$$F_{dop} = F_0 * \frac{\left(1 + \frac{V}{c}\right)}{\left(1 - \frac{V}{c}\right)} - F_0. \quad (3.16)$$

В випадку польоту ЛА, його швидкість потрібно розбити на дві складові: вертикальну і горизонтальну. Кожну з цих швидкостей слід розглянути окремо. Спочатку розглянемо горизонтальну швидкість.

Насамперед знайдемо еквівалентну доплерівську швидкість, для цього необхідно оцінити переміщення ЛА по горизонтальній осі за час, в протягом якого радіолокаційний сигнал проходить відстань ЛА - поверхня - ЛА. Оскільки швидкість світла багато більше швидкості польоту ЛА, то похибка, що отримується при такому вимірі, буде дуже мала. Отже, якщо нам відомо відстань  $R_0$ , яке є похилій дальністю для даного фацета, ми можемо знайти час затримки в такий спосіб:

$$T_{min} = \frac{2 \cdot R_0}{3 \cdot 10^8}. \quad (3.17)$$

Знаючи час, ми можемо знайти еквівалентну переміщення по горизонтальній осі:

$$dL = VH \cdot T_{min}. \quad (3.18)$$

Де  $VH$  - горизонтальна швидкість польоту ЛА. Слід розуміти, що при такому підході необхідно дізнатися різницю ходу випромінюваного і відбитого променів радіовисотомір. За рахунок того, що літак перемістився вздовж горизонтальної осі, довжина відбитого від підстильної поверхні променя ПП-ЛА змінилася щодо випромінюваного променя ЛА - ПП. Довжина відбитого променя може бути менше або більше в залежності від того, куди спрямований вектор горизонтальної швидкості (вперед або назад), яке розташування фацета щодо ЛА (попереду або позаду).

Нижче зображені можливі варіанти: при відсутності горизонтальної швидкості і при наявності, при розташуванні фацета як попереду, так і позаду ЛА (Рис. 3.11).

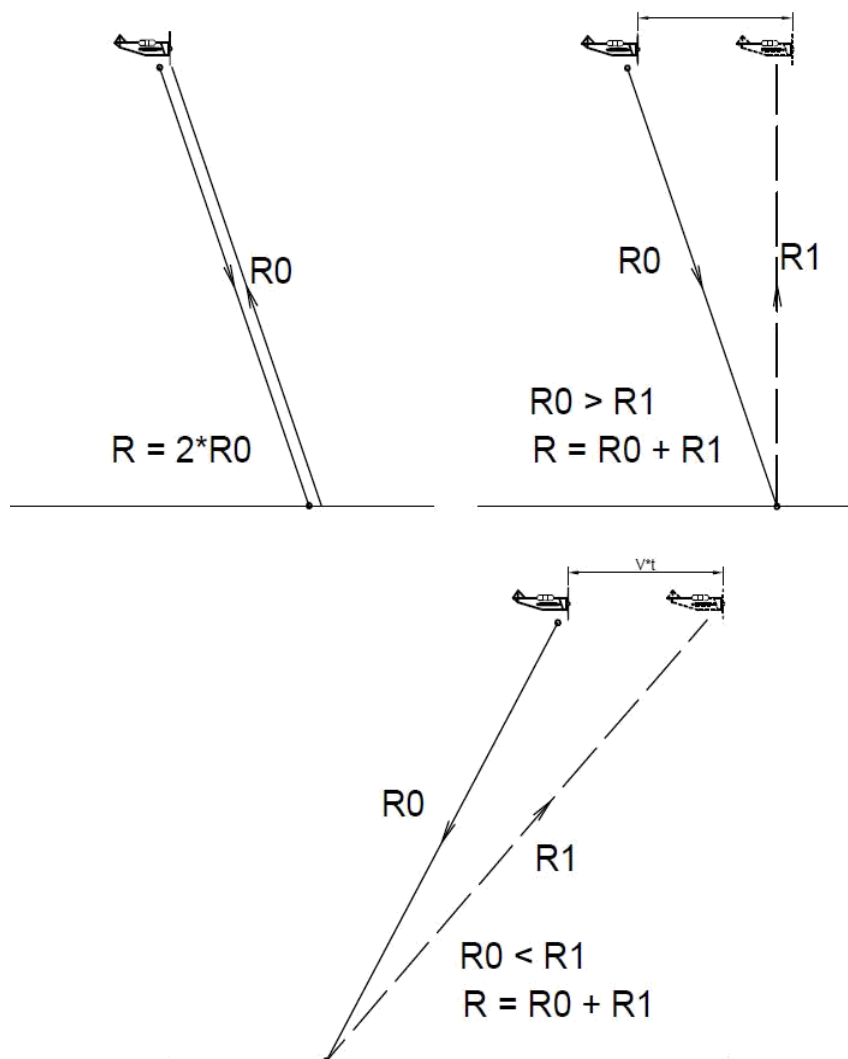


Рис. 3.11 Ілюстрація впливу горизонтальної швидкості ЛА

Знайдемо далі відстань в горизонтальній площині  $L1$ , яке необхідно для знаходження довжини відбитого променя ПП - ЛА. Також знайдемо нову похилу дальність  $R1$ :

$$L1 = \sqrt{(i - dL)^2 + j^2}, \quad (3.19)$$

$$R1 = \sqrt{L1^2 + H^2}.$$

Наступним дією потрібно знайти доплерівську швидкість, яка знаходиться, виходячи з знання різниці ходу випромінюваного і відбитого променів і розрахованого раніше значення часу затримки. Відразу після цього ми можемо знайти приріст доплерівської частоти по загальновідомою формулою.

$$VHdop = (R1 - R0) / T_{min}, \quad (3.20)$$

$$FHdop = F0 \cdot \frac{1 + \frac{VHdop}{3 \cdot 10^8}}{1 - \frac{VHdop}{3 \cdot 10^8}} - F0. \quad (3.21)$$

Таким чином, ми отримали доплерівський приріст частоти, викликане горизонтальним переміщенням ЛА для одного з фацетів. Цю частоту необхідно розраховувати для кожного з фацетів. Тепер розглянемо доплерівський приріст частоти для вертикальної швидкості.

Аналогічним чином потрібно знайти час затримки по формулі (3.17), потім знаходиться шлях, пройдений ЛА уздовж вертикальної осі за цей час:

$$dH = VV \cdot T_{min}. \quad (3.22)$$

Де  $VV$  - вертикальна швидкість польоту ЛА. В даному випадку, аналогічно попередньому, довжина відбитого променя може бути менше або більше випромінюваного в залежності від того, знижується або набирає висоту ЛА. На малюнку наведені пояснення для зльоту і посадки ЛА ( Рис. 3.12):

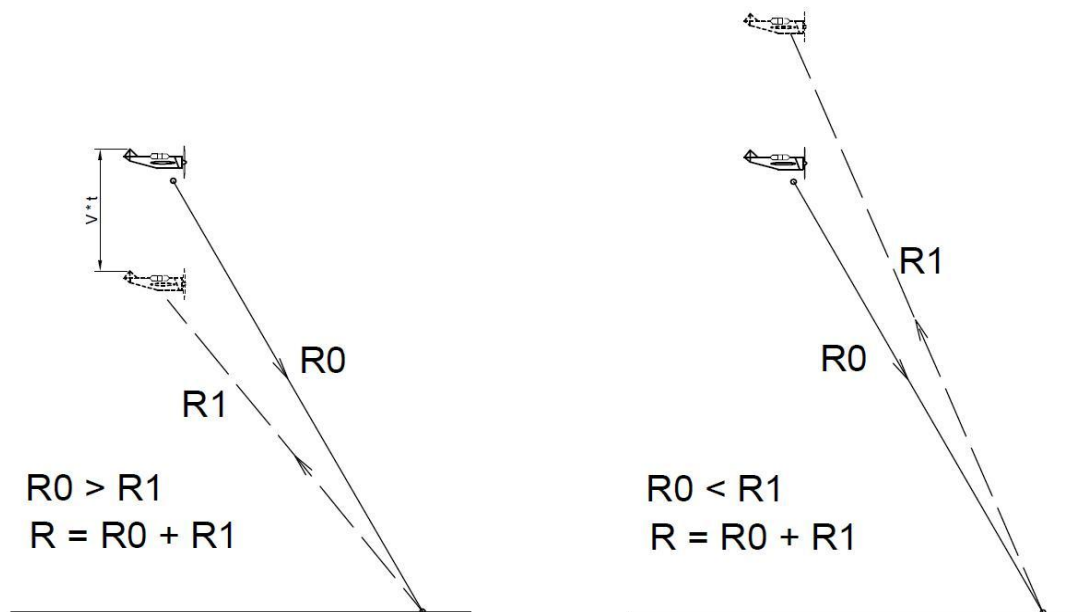


Рис. 3.12 Ілюстрація впливу вертикальної швидкості

Тепер знайдемо значення відбитої похилій дальності  $R2$ :

$$R2 = \sqrt{L1^2 + (H - dH)^2}. \quad (3.23)$$

Наступним етапом ми знову знаходимо доплерівську швидкість, еквівалентну переміщенню ЛА по вертикалі. Тепер у нас є все необхідне для пошуку доплерівського збільшення частоти, яке буде розраховано за загальновідомою формулою:

$$VH_{dop} = (R2 - R0) / T_{min}, \quad (3.24)$$

$$FH_{dop} = F0 \cdot \frac{1 + \frac{VH_{dop}}{3 \cdot 10^8}}{1 - \frac{VH_{dop}}{3 \cdot 10^8}} - F0. \quad (3.25)$$

Отже, на цьому закінчено розрахунок доплерівських збільшень частоти як для горизонтальної, так і для вертикальної складових швидкостей. Дані характеристики необхідно розраховувати для кожного з фацетів.

### 3.3.2 Енергетична характеристика фацетів.

Для того, щоб отримати спектр сигналу биття, необхідно мати набір частот сигналу биття, який отримано шляхом відображення випромінюваного

сигналу від набору фацетів, рівномірно розподілених в площині підстильної поверхні. Залежно від величини дальності від ЛА до центру фацета змінюється частота биття. Однак крім частоти биття, змінюється і відображена потужність, яка приходить в приймач радіовисотомір.

Потужність гармоніки кожного фацета  $P$  може бути обчислена з урахуванням коефіцієнтів ДНА, кутових еволюцій ЛА, дальності  $R$ , форми ДЗР підстильної поверхні за формулою:

$$P = K \frac{Gd \cdot Ga^2}{R^4} dS \cdot P_i, \quad (3.26)$$

де  $K = \frac{P_0 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3}$  – коефіцієнт обліку постійних параметрів: потужності передатчика  $P_0$  і довжини хвилі  $\lambda$  ;

$Ga$  - коефіцієнт ДНА в напрямку на фацет ;

$Gd$  - коефіцієнт ДЗР в напрямку на фацет ;

$dS$  - площа елемента поверхні ;

$P_i$  - випадковий коефіцієнт відображення від фацета.

Коефіцієнти ДНА  $Ga$  і ДЗР  $Gd$  можна розрахувати різними способами, наприклад: апроксимувати ці коефіцієнти по Гауссовському розподілу, або використовувати функцію  $\frac{\cos x}{x+1}$ , або  $\frac{\sin x}{x}$ . Можливі й інші варіанти.

Розглянемо випадок, коли використовується Гаусовський розподіл. Коефіцієнт ДНА в напрямку на фацет  $Ga$  можна розрахувати за наступною формулою:

$$Ga = \exp \left( - \left( \frac{0.59 \cdot fia}{DNA/2} \right)^2 \right). \quad (3.27)$$

Де  $fia$  – кут між лінією дальності « ЛА – фацет » і віссю ДНА. Коефіцієнт ДЗР в напрямку на фацет  $Gd$  розраховується за наступною формулою:

$$Gd = \exp \left( - \left( \frac{0.59 \cdot fi}{DOR/2} \right)^2 \right). \quad (3.28)$$

Де  $fi$  - кут між лінією дальності «ЛА - фацет» і віссю ДЗР.

Для наочності даного типу розподілу можна побудувати його графік, наприклад, за допомогою пакета MathCAD (Рис. 3.13).

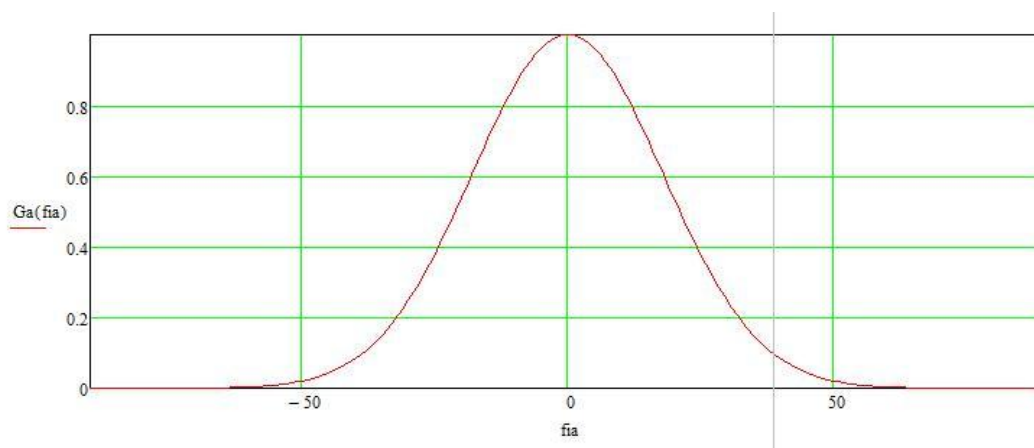


Рис. 3.13 Вид Гауссова апроксимації

В випадку розподілу типу  $\frac{\cos x}{x+1}$  розподіл виглядає інакше, хоча є імітація бічних пелюсток. Розглянемо це докладніше.

Коефіцієнт ДНА в напрямку на фацет  $Ga$  розраховується за наступною формулою:

$$Ga = \frac{\left| \cos\left(\frac{\pi \cdot fia}{DNA \cdot 1.25}\right) \right|}{\left| \left(\frac{\pi \cdot fia}{DNA \cdot 1.25}\right) \right| + 1}. \quad (3.29)$$

Де  $fia$  – кут між лінією дальності « ЛА – фацет » і віссю ДНА.

Коефіцієнт ДЗР в напрямку на фацет  $Gd$  розраховується за наступною формулою:

$$Gd = \frac{\left| \cos\left(\frac{\pi \cdot fi}{DOR \cdot 1.25}\right) \right|}{\left| \left(\frac{\pi \cdot fi}{DOR \cdot 1.25}\right) \right| + 1}. \quad (3.30)$$

Де  $fi$  – кут між лінією дальності « ЛА - фацет » і віссю ДЗР.

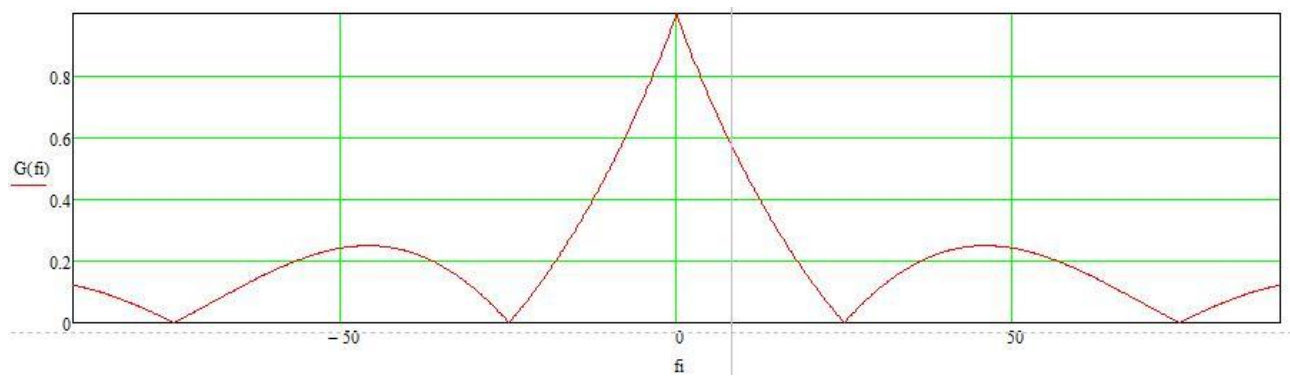


Рис. 3.14 Вид апроксимації типу  $\frac{\cos x}{x+1}$

При розподілі типу  $\frac{\sin x}{x}$  коефіцієнт ДНА в напрямку на фацет  $Ga$  розраховується за такою формулою:

$$Ga = \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi \cdot fia}{DNA \cdot 0.825}\right) \right|}{\left| \left(\frac{\pi \cdot fia}{DNA \cdot 0.825}\right) \right| + 1}. \quad (3.31)$$

Де  $fia$  – кут між лінією дальності « ЛА – фацет » і віссю ДНА.

Коефіцієнт ДЗР в напрямку на фацет  $Gd$  розраховується за наступною формулою:

$$Gd = \frac{\left| \cos\left(\frac{\pi \cdot fi}{DOR \cdot 1.25}\right) \right|}{\left| \left(\frac{\pi \cdot fi}{DOR \cdot 1.25}\right) \right| + 1}. \quad (3.32)$$

Де  $fi$  – кут між лінією дальності « ЛА - фацет » і віссю ДЗР.

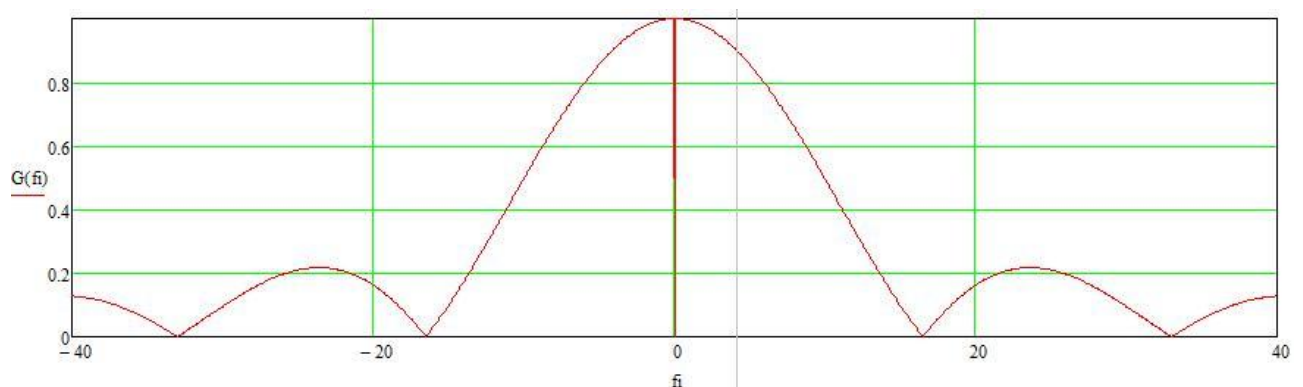


Рис. 3.15 Вид апроксимації типу  $\frac{\sin x}{x}$

Після обчислення потужності відбитого сигналу розрахунок параметрів поточного фацета можна вважати закінченим. Так, після повного виконання



циклів, програма записує в пам'ять масив, що складається з п'яти складових: перша - набір похилих дальностей, друга - відповідна кожної з розрахованих діяльностей потужність, третя - набір висот, четверта і п'ята - доплерівське приріст частоти для горизонтальної та вертикальної швидкостей.

### 3.4 Розрахунок спектра сигналу биття.

Коли є дані про похилу дальності (відстань  $R$ ), то неважко знайти час проходження радіохвилею цієї відстані. У поточній математичної моделі приймемо, що швидкість поширення радіохвиль дорівнює швидкості світла у вакуумі. Тоді, знайти час проходження радіохвилею відстані «ЛА – ПП – ЛА» (час затримки) можна за формулою:

$$T_z = \frac{2 \cdot R}{3 \cdot 10^8}. \quad (3.33)$$

Крім того, у вихідних параметрах для виконання програми задані період девіації  $T_0$  і частота девіації  $dF$ . Так, ми можемо знайти швидкість зміни частоти. Для цього запишемо відповідну формулу:

$$VdF = \frac{dF}{T_0}. \quad (3.34)$$

Коли нам відомі швидкість наростання частоти передавача і час затримки, можна порахувати різницю частот випромінюваного і прийнятого сигналів. Ця різниця частот і є частотою биття. До неї треба додати доплерівські частоти. Так, можна отримати масив частот биття радіовисотоміру за такою формулою:

$$Fb = VdF \cdot T_z + FH_{dop} + FV_{dop}. \quad (3.35)$$

Таким чином, тепер є дані про дальності, про величину потужності сигналу, стосовно кожної дальності, а також є значення частот биття, які відповідають цим відстаням і потужностям. По суті своїй, ми маємо всі необхідні дані для побудови спектра, однак зараз він буде незручний для оцінки. Щоб зробити спектр більш наочним, зробимо наступне: Розіб'ємо частотний діапазон на відрізки певної ширини. Наприклад, задаймо цю смугу у

вхідних параметрах,  $H_{step}$  при значенні вихідної висоти 1000 м. Попередньо за допомогою заданих коефіцієнтів  $H_{min}$  і  $H_{max}$  задаються кордону частотного діапазону. По суті своїй, дані коефіцієнти дозволяють зробити графік більш наочним:

$$\begin{aligned} \min Fb &= H_{min} * H * 2 * VdF / (3 * 10^8), \\ \max Fb &= H_{max} * H * 2 * VdF / (3 * 10^8). \end{aligned} \quad (3.36)$$

Потім необхідно перевірити всі раніше розраховані частоти биття на потрапляння всередину цього частотного діапазону. Якщо деякі частоти з масиву частот биття потрапляють всередину цього відрізка, то необхідно підсумувати потужності гармонік від кожної з цих частот, і записати в пам'ять.

```
for i = minFb: (Hstep): maxFb
    n = n+1 ;
    Pg0(n) = 0;
    Fg(n) = i;
    for j = 1: k
        if Fb(j) < i
            if Fb(j) >= (i-Hstep)
                Pg0(n) = Pg0(n) + P(j);
            end
        end
    end
end
```

Таким чином, в результаті виконання такої програми буде отримано масив з двох рядків. Один рядок буде містити центральні частоти для кожного з досліджених частотних діапазонів (відрізки по 100 Гц). Другий рядок буде містити значення сумарної потужності, відбитої від тих фацетів, частоти биття яких потрапляє в заданий частотний відрізок.

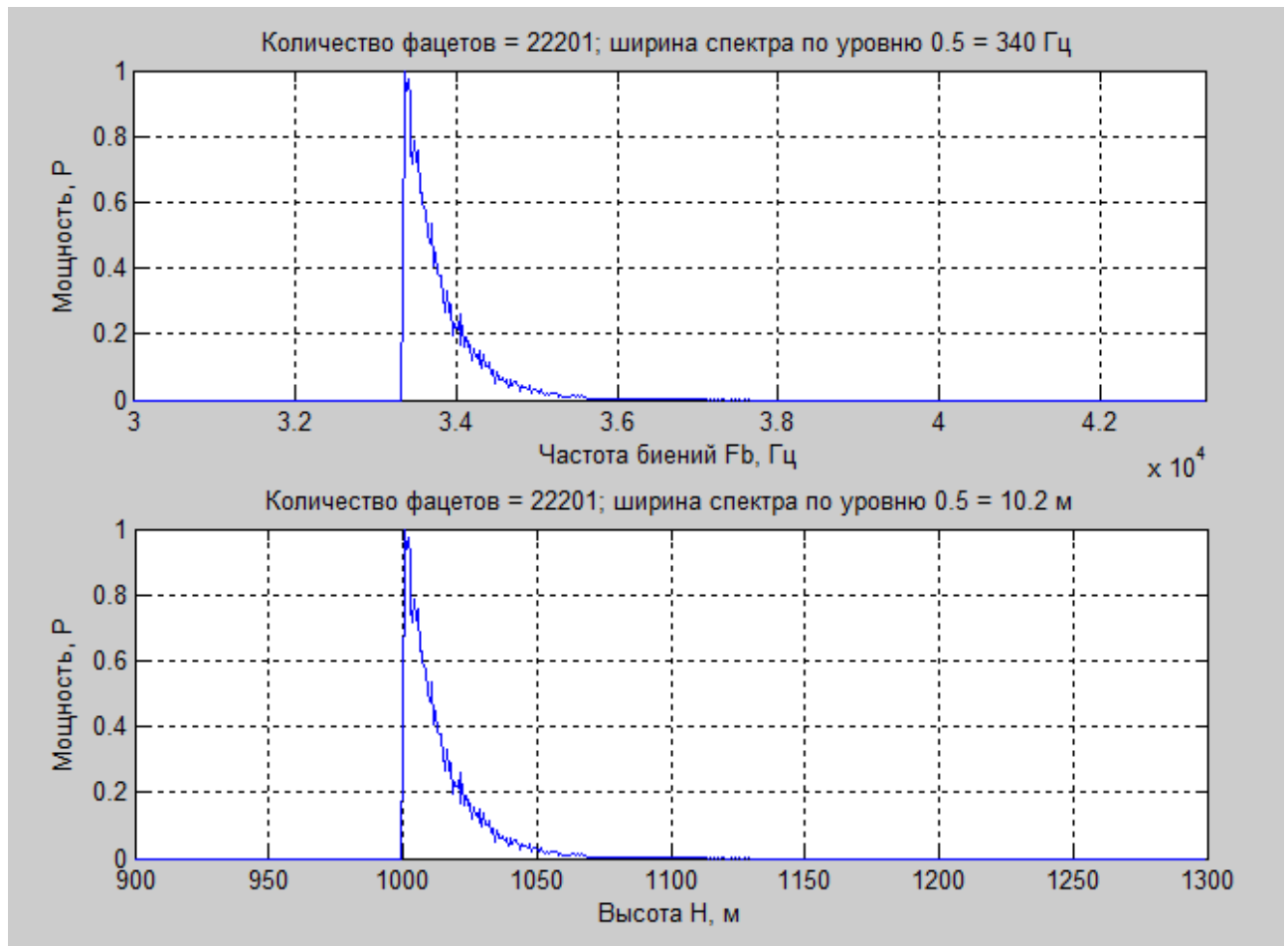


Рис. 3.16 Змодельований спектр сигналу биття.

Для побудови графіка спектра необхідно унормувати розраховані значення потужностей. При побудові виводиться один графік в двох варіантах координатних осей. Один під одним. При першому варіанті будується графік спектра в координатах Потужність - Частота биття, а в другому: Потужність - висота, для наочності.

Отже, на цьому робота програми завершена, після закінчення виконання програми ми отримуємо шуканий графік спектра частоти биття радіовисотомір.

### 3.5 Загальний підхід до створення шаруватої моделі підстильної поверхні.

В даному розділі буде описана методика моделювання поверхонь, які можна представити у вигляді шарів. Основним завданням даного розділу є опис одного з методів моделювання лісової поверхні.

Ліс є складною і неоднозначною поверхнею для математичного моделювання. Як було написано раніше, існує досить велике різноманіття лісів, як в світі, так і в Україні. З точки зору моделювання такої підстильної поверхні можна виділити кілька варіацій рослинності:

- однорідний по щільності насаджень і висоті рослинності ліс. Наприклад, сосновий ліс часто має саме такими характеристиками: всі дерева можна вважати приблизно однаковими по висоті і можна усереднити кількість дерев на одиницю площі (Рис. 3.17);
- однорідний по щільності насаджень, але неоднорідний за висотою дерев ліс. Наприклад, листяний ліс з підліском у вигляді чагарників. Такий ліс часто можна усереднити за кількістю дерев на одиницю площі (Рис. 3.18);
- неоднорідний по щільності насаджень ліс. Тут можна розглядати різні варіанти: степ, окреме дерево в полі і т. д. (Рис. 3.19).



Рис. 3.17 Сосновий ліс



Рис. 3.18 Листяний ліс



Рис. 3.19 Рідкісний ліс, степ

Перші два типи лісу можна представити у вигляді шаруватої структури. Наприклад, візьмемо сосновий ліс. Будемо вважати, що даний ліс не містить підліску (грунтовий шар може бути засипаний хвоєю і не мати рослинності). Середня висота ДЗРослої сосни становить від 25 до 40 метрів. Усереднити це значення і будемо вважати, що середня висота дерева складає 30 метрів, а зелена частина дерев знаходиться в межах від 25 до 35 метрів від земної поверхні. Стовбури дерев мають досить малу площу, тому в Фацетні моделі їх враховувати не будемо. Грунтовий шар будемо вважати однорідним і рівномірним, але з невеликим рівнем рельєфу (наприклад, будемо вважати, що рівень висоти фацетів буде лежати в межах від 0 до 1 метра). Таким чином, ми отримали модель поверхні у вигляді шарів.



Рис. 3.20 Спрощена модель соснового лісу

- Перший шар - ґрунтовий, володіє невеликим розкидом по висоті (від 0 до 1 метра). Для цього шару нам задана ДЗР, коефіцієнт відображення, максимальний кут відхилення нормалі фацета від вертикалі;
- другий шар - «зелена» частину рослинності. Даний шар існує в діапазоні висот від 25 до 35 метрів. Для нього також задані ДЗР, коефіцієнт відображення, середньоквадратичний кут відхилення нормалі фацета від вертикалі.

Таким чином, ми отримали спрощену модель, що складається з двох шарів: ґрунт і «зелена» частину рослинності (Рис. 3.20). Між цими шарами в даній моделі порожнеча. Очевидно, що подібну модель легко модернізувати під різні типи лісів. Наприклад, в вищеописану модель можна додати шар підліску, існуючий в діапазоні висот від 1 до 2 метрів. Збільшення або зменшення щільності якого - або з шарів можна регулювати шляхом зміни кількості

фацетів в цьому шарі. Крім того, для кожного шару можна індивідуально задавати параметри: ДЗР, середньоквадратичний кут відхилення нормалі фацета від вертикалі, коефіцієнт відображення.

### **3.5.1 Приклад шаруватої моделі соснового лісу.**

Розглянемо більш докладно математичну модель соснового лісу з підліском. Будемо вважати, що ліс в даному випадку щільний, «зелена» частину дерев являє собою щільний шар.

При моделюванні такої поверхні для нас головна мета - отримати масив з набором похилих дальностей для кожного фацета і відносної потужністю відбитого сигналу. В даному випадку швидкість обчислення не має серйозного значення. Тому програма буде побудована за принципом найбільшої наочності.

Кожен із шарів, що містять фацети, буде обраховуватися в окремому циклі. Так, для розрахунку ґрунтового шару оголошується перший цикл, в результаті виконання якого заповнюється шуканий масив. Потім запускається другий цикл для розрахунку, наприклад, підліску, результат виконання якого записується в той же самий масив, розширюючи його. Точно також і для кожного з наступних шарів.

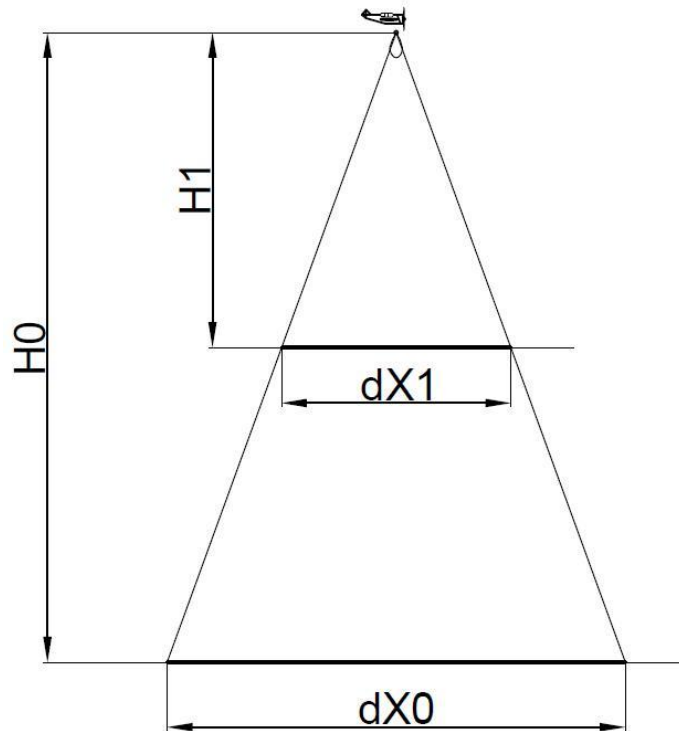


Рис. 3.21 Різниця площі плями, що опромінюється РВ, при різних висотах

Оскільки в вихідній моделі все фацети знаходилися в одній площині і не мали розкиду по висоті, то параметри прямокутника, що обмежує пляма опромінення розраховувалися один раз. Тепер цю межу потрібно коригувати індивідуально для кожного з шарів. Адже зі зменшенням відстані від ЛА до деякого шару буде зменшуватися і розмір плями опромінюється передавальною антеною РВ (Рис. 3.21).

Програма заснована на раніше описаній математичній моделі, однак вона має кілька змінену структуру. Програма для моделі шаруватої поверхні має ряд доповнень і удосконалень: має додаткові вхідні параметри, а цикл розрахунку параметрів фацетів кожного з шарів винесено в окрему функцію. Також зміни внесено і в тіло циклу. Нижче більш докладно розглянемо ці зміни.



### 3.6 Додаткові вхідні параметри для настройки шарів.

Оскільки даної математичної моделі моделюється складніша поверхню, то необхідно ввести ряд додаткових вхідних параметрів. Вони зроблять моделювання поверхні більш гнучким і універсальним. Для кожного з модельованих шарів шаруватої моделі поверхні ці параметри необхідно ставити індивідуально. Нижче перерахуємо їх.

*Середній рівень висоти для шару  $dHx$ .* Даний параметр вказує орієнтир, середній рівень по висоті для одного з шарів в шаруватій моделі. Так, наприклад, для ґрунтового шару цей параметр можна задати 0 метрів, а для шару зеленої частини соснового лісу - 30 метрів.

*Рівень дисперсії по висоті для шару  $dHx$ .* Даний параметр характеризує розкид фацетів по висоті ( середньоквадратичне відхилення ), щодо раніше заданого середнього рівня. Наприклад, для ґрунтового шару такий параметр можна задати рівним 0,4. Це означає, що фацети ґрунтового шару можуть володіти заданим рівнем висоти з математичним очікуванням  $dHx$  і середньоквадратичним відхиленням, рівним 0,4. А для зеленої частини соснового лісу цей параметр можна задати рівним 5 ( даний шар існує приблизно в діапазоні висот від 25 до 35 метрів ). Закон розподілу для даного параметра - нормальний.

*Рівень збільшення ДЗР для шару  $dDORx$ .* Різні ділянки поверхні можуть відрізнятися, а значить, може відрізнятися і діаграма зворотного розсіювання для різних фацетів. Даний параметр введено в програму з метою спробувати зробити її більш гнучкою і універсальною. Значення параметра  $dDOR0$ , розподілені за нормальним законом, підсумовуються з вихідним значенням ДЗР, роблячи її вже або ширше для різних фацетів.

*Середній рівень коефіцієнта відбиття для шару  $Pix$ .* Даний параметр характеризує відображають властивості фацета. закон розподілу - Релеєвського.

*Коефіцієнт середньоквадратичного кута відхилення нормалі фацета від вертикалі  $alpx$ .* У різних шарах фацети можуть мати різний кут відхилення, що

забезпечує і різні відображають властивості шарів. Даний коефіцієнт у програмі множиться на початкове значення середньоквадратичного відхилення кута  $\alpha_p$ . Таким чином, можна збільшити або зменшити ступінь відхилення фацетів в кожному шарі.

*Коефіцієнт кроку для шару  $dstepx$ .* Даний коефіцієнт множиться на вихідний параметр  $step$ , дозволяючи тим самим збільшувати або зменшувати кількість фацетів якого - то з шарів, регулювати потужність відбитого від шару сигналу.

### 3.6.1 Зміни, внесені в тіло циклу.

Як зазначалося раніше, для найбільшої наочності програма математичної моделі шаруватої структури заснована на описаній раніше основній програмі. Зміни внесені в блок вихідних параметрів і в тіло циклу розрахунку параметрів фацетів. Власне, цей цикл винесено в окрему функцію. Нижче розглянемо ті зміни, які торкнулися тіла циклу, а потім розглянемо вхідні і вихідні параметри функції, всередині якої цей цикл виконується.

Перша зміна внесено вже в оголошення двох вкладених циклів: для регулювання кількості фацетів шару проводиться множення початкового етапу сітки фацетів  $step$  на додатковий коефіцієнт  $dstepx$ .

```
for i= Xmin: dstep0*step: Xmax  
    for j= Ymin: dstep0*step: Ymax
```

Як видно, після оператора задаються верхня і нижня межі циклу, а також крок лічильника. Саме в аргумент кроку і внесені зміни: доданий множник, призначення якого описано вище.

Далі всередині вкладених циклів йде розрахунок вихідних параметрів для кожного нового фацета (одні крок циклу - один фацет): висота, значення ДЗР, значення коефіцієнта відображення фацета, кут відхилення нормалі фацета від вертикалі і фаза ( поворот ) фацета:

```
H=H0 - dHx - dhx * randn(1);  
DOR = DOR0 + dDORx * randn(1);  
Pi = Pix + abs(dPix*randn(1));
```

```
alpha = abs(randn(1)*alp)*alp*pi/180;
beta = rand(1)*2*pi;
```

Як і було описано раніше, нова модель є більш гнучкою. Для кожного з фацетів розраховується значення висоти виходячи із заданої початкової висоти  $H_0$ , висоти  $dH_x$  шару і випадкової компоненти  $dh_x$  (із заданою дисперсією). Потім розраховуються значення ДЗР, коефіцієнта відображення, кута відхилення фацета ( з урахуванням заданого коефіцієнта ) і фаза фацета.

Оскільки висота шарів фацетів може бути різною для різних верств, на відміну від вихідної моделі, де всі фацети знаходилися на одному рівні, то необхідно для кожного нового шару фацетів вважати розмір прямокутника - плями, що освітлюється радіовисотоміром. Параметри цього прямокутника розраховуються до початку виконання циклу, тобто на початку виконання функції, яка розраховує параметри одного з шарів.

Отже, після розрахунку вихідних параметрів в циклі відсутні принципові зміни і доопрацювання, тому докладний опис приводити не будемо.

Важливим є те, що в даній програмі для кожного з шарів шаруватої моделі окремо задані додаткові вихідні параметри (скільки шарів, стільки і наборів додаткових параметрів).

Аналогічно, для кожного з шарів в програмі є свій цикл розрахунку параметрів фацетів, який розраховується всередині функції (скільки шарів, стільки і циклів, стільки раз і викликається функція). В результаті виконання всіх цих циклів ми отримуємо один великий масив, що містить дані про похилих висотах і відповідних їм потужностям відбитих сигналів, а також про доплерівських частотах.

### **3.7 Опис функції розрахунку параметрів фацетів `layer.m`.**

Функція `layer.m` написана на мові MatLAB і вдає із себе `***.m` - файл. Функція призначена для розрахунку параметрів фацетів одного з шарів математичної моделі підстильної поверхні. Таким чином, щоб розрахувати

параметри фацетів одного з шарів, тепер в основній програмі досить викликати функцію `layer.m`. Слід зазначити, що виконуваний файл функції повинен лежати в тому ж каталозі, що і виконуваний файл основної програми.

Нижче наведемо синтаксис роботи з функцією з основної програми. Так, якщо необхідно розрахувати параметри одного з шарів, в основній програмі спочатку необхідно задати додаткові параметри для цього шару.

```
%Дополнительные входные параметры для настройки слоев
%слой 0 - почва
dh0 = 0.5; %уровень дисперсии почвенного слоя 0
dH0 = 0; %средний уровень высоты в данном слое
dDOR0 = 5; %уровень дисперсии ДЗР для слоя 0
Pi0 = 0.8; %Средний уровень коэффициента отражения для слоя 0
dPi0 = 0.1; %максимальный уровень добавки коэффициента отражения
alp0 = 1; %коэффициент угла отклонения нормали фацета
dstep0 = 1; %Коэффициент шага для слоя 0
```

Далі з основної програми необхідно викликати функцію `layer.m`, яка має 5 вихідних аргументів і 19 вхідних аргументів. Нижче наведемо синтаксис виклику функції.

```
[R1, Hd1, P1, FVdop1, FHdop1] = layer(H0, DNA, DOR0, KREN, TANG,
alp, F0, P0, step, varDN, VH, VV, dh0, dH0, dDOR0, Pi0, alp0,
dstep0);
```

Отже, наведемо короткий опис вхідних аргументів функції:

- вихідна висота  $H_0$ ;
- ширина діаграми спрямованості антени передавача  $DNA$ ;
- ширина діаграми зворотного розсіювання  $DOR_0$ ;
- кут крену ЛА  $KREN$ ;
- кут тангажу ЛА  $TANG$ ;
- середньоквадратичне значення кута відхилення нормалі до площини фацета від вертикалі  $alp$ ;
- робоча частота передавача  $F_0$ ;
- потужність передавача  $P_0$ ;
- крок сітки фацетів  $step$ ;
- вибір типу апроксимації ДНА  $varDNA$ ;
- вибір типу апроксимації ДЗР  $varDOR$ ;

- горизонтальна швидкість руху ЛА  $VH$ ;
- вертикальна швидкість руху ЛА  $VV$ ;
- рівень дисперсії по висоті для шару  $dhx$ ;
- середній рівень висоти для шару  $dHx$ ;
- рівень дисперсії ДЗР для шару  $dDORx$ ;
- середній рівень коефіцієнта відбиття для шару  $Pix$ ;
- коефіцієнт кута відхилення нормалі фацета від вертикалі  $alpx$ ;
- коефіцієнт кроку для шару  $dstepx$ .

Детальний опис всіх цих параметрів було приведено раніше, тому на цьому зупинятися не будемо. Нижче наведемо опис вихідних аргументів функції:

- похила дальність  $R1$  для кожного фацета ;
- реальна висота  $Hd$  для кожного розрахованого фацета ;
- потужність, відбита від фацета  $P$ ;
- доплерівська частота для вертикальної швидкості  $FVdop$  для кожного з фацетів ;
- доплерівська частота для горизонтальної швидкості  $FNdop$  для кожного з фацетів.

Слід зазначити, кожен з усіх цих п'яти параметрів представляє з себе вектор - рядок. Причому всі ці рядки мають одну розмірність, рівну кількості розраховуються фацетів.

Після розрахунку декількох шарів за допомогою виклику функції `layer.m`, отримаємо кілька наборів векторів - рядків. Так, необхідно об'єднати відповідні вектори - рядки в один рядок. Наприклад, таким чином.

```
R = [R1, R2, R3];
Hd = [Hd1, Hd2, Hd3];
P = [P1, P2, P3];
FVdop = [FVdop1, FVdop2, FVdop3];
FNdop = [FNdop1, FNdop2, FNdop3];
```

Як видно, тут об'єднані дані від обчислення трьох шарів. Отримані дані обробляються далі в основній програмі: проводиться розрахунок частот биття, розрахунок і побудова спектра частот биття.

Лістинг основної програми і функції `layer.m` наведені відповідно в дод. 1 і дод. 2.

### **3.8 Моделювання підстильної поверхні за допомогою програми тривимірної візуалізації.**

Як вже було написано раніше, досліджувану поверхню можна намалювати в програмі тривимірної візуалізації, наприклад, в 3Ds MAX. Далі ця поверхня розбивається на трикутники - полігони, які можуть бути використані як фацети. Потім необхідно витягти з дизайнерської програми координати вершин цих трикутників, відповідним чином їх опрацювати за допомогою MatLAB і потім вже розрахувати спектр сигналу биття.

Як було показано раніше, об'єкти в програмі тривимірної візуалізації можна подати з різним ступенем деталізації (Рис. 2.10). З точки зору радіовисотомір, занадто дрібні об'єкти не мають ніякого значення, тому буде досить апроксимувати тривимірні об'єкти лише до загальних обрисів (Рис. 2.11).

#### **3.8.1 Для отримання координат з програми 3Ds MAX.**

В ході виконання роботи було прийнято рішення використовувати найбільш популярну програму тривимірної візуалізації - 3D studio MAX. Основними користувачами даного програмного пакета є дизайнери, тому інструмент для вилучення координат вершин трикутників - полігонів не дуже добре розвинений. Дані про координати об'єкта можна отримати за допомогою інструмента «ASCII Scene Export», внаслідок роботи якого виходить файл формату `***.ASE`.

Як написано в [12], ASCII (англ. American standard code for information interchange) - назва таблиці (кодування, набору), в якій деяким поширеним друкованим і недрукованим символів зіставлені числові коди. Таблиця була розроблена і стандартизована в США в 1963 році.

Що нас цікавить формат, містить дані про трикутниках - полігонах в наступному форматі. Перша група даних являє собою координати всіх вершин досліджуваного об'єкта сцени (по три координати на кожную вершину). Друга група даних являє собою показчик на координати вершин для кожного з полігонів (кожен полігон являє собою трикутник, заснований на трьох вершинах, разом 9 координат на кожен полігон). Для отримання \*.ase - файлу з мінімальною кількістю даних (максимально прибрати все не потрібні дані) потрібно скористатися наступними настройками експорту файлу (Рис. 3.22).

Слід зазначити, що можливості програми 3Ds MAX дозволяють задавати додаткові параметри для об'єктів. Перелік цих параметрів настільки широкий і універсальний, що при належному знанні програми, можна задавати різні параметри об'єктів сцени, аж до унікальних, описуваних користувачем. Так, можна задати, наприклад, коефіцієнт відображення для полігону, ДЗР та інші параметри.

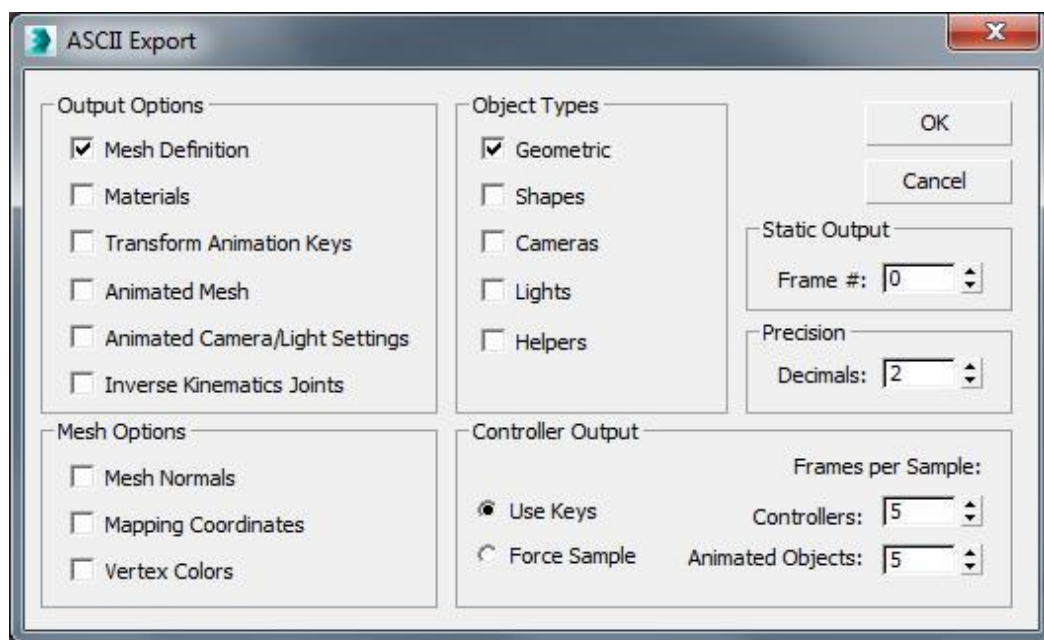


Рис. 3.22 Експорт даних про координатах

Файл, що експортується з 3Ds MAX містить досить багато сторонньої інформації. Відфільтрувати непотрібні дані і представити необхідні в потрібному форматі можна за допомогою поширених засобів, типу Microsoft Excel або можна написати відповідну програму на одній з мов програмування. У даній роботі була використана програми Microsoft Excel.

В результаті перетворень необхідно отримати два \*.txt файлу. Перший файл «xyz.txt» складається з кількості рядків, рівних кількості вершин об'єкта і трьох стовпців, де кожен стовець характеризує одну з трьох координат вершин - X, Y, Z. Третій ( Z) стовець характеризує вертикальну координату в декартової системи координат, а перший другий стовпці ( X, Y ) відповідають горизонтальній площині. Другий файл «point. txt» являє собою покажчик на вершини трикутників - полігонів. Він складається з кількості рядків, рівних кількості полігонів об'єкта і трьох стовпців, в кожному з яких є одна цифра, яка відправляє на рядок файлу «xyz.txt» і посилається на відповідну вершину. Такий формат представлення даних використовується тому, що так для характеристики одного полігону потрібно менший обсяг даних. При великій кількості об'єктів 3Ds MAX розміри цих двох файлів можуть досягати сотень мегабайт, тут і стає виправданою така система.

### **3.8.2 Опис функції розрахунку параметрів фацетів layer3D.m.**

Функція layer3D.m заснована на описаній раніше функції layer.m. Однак ця функція не містить вкладених циклів, всі обчислення проводяться в одному циклі. Спочатку в основній програмі потрібно завантажити дані про координати полігонів, що зберігаються в файлах «xyz.txt» і «point. txt» за допомогою функції load:

```
load point.txt  
load xyz.txt.
```

Потім проводиться виклик функції layer3D.m. Тут основним лічильником циклу є файл - покажчик, прочитуючи кожен його рядок, програма завантажує 9 чисел з файлу координат, відповідні координатам трьох вершин кожного



трикутника - полігону. Наступним етапом знаходяться координати центру мас отриманого трикутника. Знаходяться отримані координати як середнє арифметичне координат трьох точок, що утворюють трикутник:

$$\begin{aligned}XC &= \frac{x_1+x_2+x_3}{3}, \\YC &= \frac{y_1+y_2+y_3}{3}, \\ZC &= \frac{z_1+z_2+z_3}{3}.\end{aligned}\tag{3.37}$$

Де  $x$ ,  $y$  і  $z$  – координати однієї з вершин трикутника – полігону.

Потім, виходячи з знань векторної алгебри та аналітичної геометрії потрібно знайти координати нормального вектора до досліджуваного трикутника – полігону. Наведемо лише остаточний результат обчислення цих координат:

$$\begin{aligned}XM &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2), \\YN &= z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2), \\ZN &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2).\end{aligned}\tag{3.38}$$

Крім того, для розрахунку потужності сигналу, відбитого від полігону, необхідно розрахувати площа трикутника. Як відомо, площа трикутника ДЗРівнює половині векторного добутку векторів, на яких він побудований. Так, потрібно знайти спочатку координати двох векторів, на яких побудований трикутник:

$$\begin{aligned}A_x &= x_2 - x_1, \\A_y &= y_2 - y_1, \\A_z &= z_2 - z_1, \\B_x &= x_3 - x_1, \\B_y &= y_3 - y_1, \\B_z &= z_3 - z_1.\end{aligned}\tag{3.39}$$

Далі знаходимо векторний добуток векторів, ділимо його навпіл і тим самим отримуємо площа трикутника:

$$DS = \frac{1}{2} * \sqrt{(Ay \cdot Bz - Az \cdot By)^2 + (Ax \cdot Bz - Az \cdot Bx)^2 + (Ax \cdot By - Ay \cdot Bx)^2}. \quad (3.40)$$

На основі отриманих даних, подальші обчислення всередині функції `layer3D.m` аналогічні функції `layer.m`. Слід зазначити, що вихідні аргументи функції `layer3D.m` не внесено жодних змін і основна програма завдяки цьому не змінюється. Вхідні ж аргументи функції дещо змінені. Нижче перерахуємо їх:

- вихідна висота `H0`;
- ширина діаграми спрямованості антени передавача `DNA`;
- ширина діаграми зворотного розсіювання `DOR0`;
- кут крену ЛА `KREN`;
- кут тангажу ЛА `TANG`;
- робоча частота передавача `F0`;
- потужність передавача `P0`;
- вибір типу апроксимації ДНА `varDNA`;
- вибір типу апроксимації ДЗР `varDOR`;
- горизонтальна швидкість руху ЛА `VH`;
- вертикальна швидкість руху ЛА `VV`;
- рівень дисперсії ДЗР для шару `dDORx`;
- середній рівень коефіцієнта відбиття для шару `Pix`;
- масив даних покажчика `pointer`;
- масив даних координат вершин `XYZ`.

Нова функція `layer3D.m` також може викликатися з основної програми неодноразово, дозволяючи розширити масиви даних про поверхню. Так, є можливість і за допомогою програми тривимірної візуалізації завантажувати поверхню окремими шарами.

Лістинг функції `layer3D.m` наведено дод. 3.

#### 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці - це система правових, нормативних, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Охорона праці спирається на комплекс державних законодавчих актів. Загальними законами України, що визначають основні положення щодо охорони праці є Конституція України, Кодекс законів про працю, Закон України “Про охорону праці”, Закон України “Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення”, Закон України “Про пожежну безпеку”, Закон України “Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності” та підзаконні акти щодо охорони праці.

Всі закони і підзаконні акти з охорони праці базуються і відповідають Основному Закону держави – Конституції України, яка гарантує право громадян України на працю, яку вони вільно обирають, або на яку вільно погоджуються, на належні, безпечні і здорові умови праці, на відпочинок і на соціальний захист.

Основним законодавчим документом щодо охорони праці є Закон України “Про охорону праці”, який прийнятий Верховною Радою України 14 жовтня 1992 року.

Задачі техніки безпеки спрямовані на попередження нещасливих випадків на виробництві. Вони зважуються на всіх етапах створення й експлуатації авіаційної техніки.

Кафедра авіоніки					НАУ 19 07 83 000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОХОРОНА ПРАЦІ	Літ.	Арк.	Аркуші
Виконав		Піскурьов В. А.						
Керівник		Слободян А.П.					91	
Консульт.		Слободян А.П.				173 Авіоніка		
Н. Контр.		Левківський В.В.						
Заф.каф..		Павлова С.В.						

**Небезпечний (виробничий) фактор** – виробничий фактор вплив якого в певних умовах може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.

**Шкідливий (виробничий) фактор** – виробничий фактор вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я зниження працездатності працівника.

**Умова праці** – сукупність факторів виробничого середовища які впливають на здоров'я і працездатність людини в процесі її професійної діяльності.

**Виробниче середовище** – сукупність фізичних, хімічних, біологічних, соціальних факторів, що діють на людину в процесі трудової діяльності.

**Міжгалузеві і галузеві акти з охорони праці** – закони, міжгалузеві і галузеві стандарти, норми, правила, положення, інструкції і інші документи з охорони праці, яким надається сила правових норм обов'язкових для виконання.

**Нагляд за охороною праці** – одна з форм діяльності державних органів по дотриманню вимог законів і інших нормативних актів з охорони праці встановлених державною владою.

#### **4.1. Перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів при технічній експлуатації.**

У процесі праці у виробничій обстановці на людину може впливати або один, або ряд небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Для запобігання цих впливів на працівників при розробці нових приладів, контрольних установок і стендів повинні виконуватися вимоги по охороні праці.

Державним стандартом ГОСТ 12.0.003-74 (1999) ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация», усі небезпечні і шкідливі виробничі фактори класифіковані на наступні групи: фізичні, хімічні, біологічні і психофізіологічні. Згідно ГОСТ 12.0.003-74 при виконанні технічного обслуговування можливі наступні фактори:

***- Підвищене значення напруги на електричному ланцюзі, замкнення якої може бути через тіло людини.***

Найчастіше зв'язані з неправильним устроєм електротехнічних установок, відсутністю заземлення, застосуванням голих проводів, шин, відкритих частин рубильників, електроламп і інструмента недосконалої конструкції та ін.

Небезпека електричного струму полягає в тому, що він не виявляється органами почуттів людини і часто зненацька виявляється на неструмоведучих частинах електроустановок і конструкціях, тобто там, де його не повинно було бути. Ступінь небезпеки поразки людини електричним струмом залежить від ряду факторів: значення сили струму, роду і частоти струму, тривалості дії, шляху протікання, стану організму, фактора уваги й умов зовнішнього середовища. Значення струму, що протікає через тіло людини, є основним чинником, що визначає ступінь поразки. Для проектування способів і засобів захисту людей при взаємодії їх з електроустановками ГОСТ 12.1.038 – 82. ССБТ. «Допустимые уровни напряжений прикосновения и токов», визначені гранично допустимі значення напруги дотику і струмів, що протікають через людину в аварійній ситуації.

***- Підвищений рівень шуму на робочому місці.***

Шум і вібрація, що перевищує стандартні норми, негативно впливають на організм людини (ГОСТ 54 72001-78). Основні джерела виробничого шуму і вібрації - шум при випробуванні авіадвигунів.

Шум є загально біологічним дратівним фактором і у визначених умовах може впливати на всі органи і системи організму людини. Його вплив на органи слуху, різні відділи головного мозку приводить до підвищеної втоми, загальній слабості, дратівливості і т.д.

***- Недостатня освітленість робочої зони при перевірках устаткування в лабораторних умовах і на літаку (ГОСТ 54 72003-82).***

При правильно розрахованому і виконаному освітленні виробничих приміщень очі працюючого протягом тривалого часу зберігають здатність добре розрізняти предмети і знаряддя праці, не стомлюючись. В умовах цивільної авіації при оперативному технічному обслуговуванні незадовільне освітлення зони обслуговування може призвести до погіршення якості виконуваних робіт.

Недостатнє освітлення робочих місць може виникати з таких причин: забруднення та недостатня кількість або працездатність деяких або усіх освітлювальних приладів; невірно підібрані чи замінені лампи в світильниках; невірне розташування сусідніх будівель.

Виробниче освітлення може бути двох видів: природне і штучне. Природне освітлення створюється за рахунок сонячного світловипромінювання. Рівень природної освітленості залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, висоти сонця над горизонтом, стану атмосфери і деяких інших факторів, що не піддаються точному облікові. Для створення штучного освітлення застосовують електричні лампи накаливання і люмінесцентні лампи. Проектування штучного освітлення ґрунтується на його розрахунку, що визначає необхідну кількість світильників і їхню потужність.

Недостатнє освітлення робочих місць є однією з причин низької продуктивності праці. При недостатньому освітленні очі працюючого сильно напружені, при цьому ускладнюється розрізнення інструментів і навколишніх приладів, знижується темп роботи і погіршується загальний стан.

Освітлення виробничих приміщень і робочих місць характеризується світловим потоком, силою світла, освітленістю, яскравістю, контрастністю. Рациональне освітлення повинне задовольняти ряд вимог: бути достатнім, щоб око без напруги могло розрізняти розглянуті деталі; постійним у часі, тому напруга в живильній мережі не повинне коливатися більше, ніж на 4%.

## **4.2. Технічні заходи, що виключають або обмежують вплив на технічний персонал небезпечних або шкідливих виробничих факторів при експлуатації обладнання систем авіоніки.**

### **4.2.1. Забезпечення електробезпеки.**

Конструктивне оформлення комплектуючих двигуна, що проектується, вирішено таким чином, щоб виключити або звести до мінімуму можливість впливу на технічний персонал перерахованих у попередньому підрозділі небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Для того щоб конструкція двигуна задовольняла вимогам електробезпеки, використовується цілий ряд технічних рішень.

Міри захисту від поразки електричним струмом залежить від вибору, розміщення, виконання, способу установки і класу ізоляції застосовуваних машин та іншого електроустаткування, а також кабелів і проводів.

Міри захисту виробляються відповідно до вимог діючих «Правил устрою електроустановок» (ПУЭ-86), а їхньої експлуатації з «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів» і «Правилами технічної безпеки при експлуатації електроустановок споживачів».

Металеві не струмоведучі частини обладнання пристрою, що проектується, повинні електрично приєднуватися до стаціонарного пристрою, що заземлює, активний опір якого повинен бути не більш 4 Ом.

Для усунення підвищеного шуму на робочому місці операторові при високих рівнях шуму необхідно користуватися спеціальними навушниками.

Для виключення недостатньої освітленості робочого місця при перевірці проектного двигуна та монтажу потрібно користуватися індивідуальним освітленням на робочому місці.

Відповідно до діючих норм і правил використовується природне, штучне або комбіноване освітлення.

Монтаж/демонтаж повинен проводитися тільки із застосуванням спеціальних інструментів, а перевезення – за допомогою візків.

Для зменшення травматизму в результаті падіння людей із висоти при обслуговуванні високо розташованих частин ЛА застосовуються спеціально передбачені для даного типу АТ трапи, підйомники і драбини. Є прив'язні ремені або пристосування для кріплення до конструкції ЛА.

На проектованому двигуні передбачені клеми для підключення захисного заземлення. Для захисту від поразки електричним струмом у випадку пробою ізоляції і переходу напруги на металевий корпус, застосовується захисне заземлення, що повинне задовольняти вимозі  $R_z \leq 4$  Ом для установок з напругою до 1000В.

#### **4.2.2. Нормалізація освітлення.**

Розглянемо вплив освітлення на організм людини. Особлива увага необхідно приділити важливому з погляду виробничої санітарії питанню освітлення на робочому місці.

Виробниче освітлення регулюється нормативно-технічними документами ГОСТ 12.1.046-85, СНиП II-4-79. Освітлення на робочому місці повинно бути сполученим (природне і штучне світло). Природне освітлення повинне бути бічним. Коефіцієнт природної освітленості повинний відповідати нормативним рівням по СНиП II-4-79: при виконанні робіт з категорії високої зорової точності – не нижче 1,5, при зоровій роботі середньої точності – не нижче 1.

Рациональне освітлення повинно відповідати ряду вимог:

- Повинно бути достатнім, щоб очі без напруги могли розрізняти деталі;
- Повинно бути постійним, для цього напруга в живлячій мережі не повинна коливатися більш ніж на 4%;
- Повинно бути рівнонаправленим робочим поверхням, щоб оку при роботі не приходилося зазнавати різкого світлового контрасту.



Штучне освітлення варто здійснювати у виді комбінованої системи освітлення з використанням люмінесцентних джерел світла у світильниках загального освітлення. Вони повинні забезпечувати рівномірну освітленість за допомогою відбитого чи розсіяного світлорозподілу.

#### **4.2.3. Забезпечення пожежної і вибухової безпеки.**

Причинами виникнення пожежі електроустаткування й електроосвітлення можуть бути: перевантаження проводів електромережі, що викликає нагрівання струмоведучих частин, загоряння їхньої ізоляції й у результаті запалення різних горючих матеріалів, що стикаються з ними; неякісне виконання з'єднань в електричній проводці; перевантаження різних електричних пристроїв

(електродвигуни, генератори, розподільні пристрої і т.п.), що приводить до їх нагрівання і, отже, можливого загоряння; несправне охолодження електропристрою, неправильне його вмикання; коротке замикання, іскріння на колекторі або кільцях електродвигуна і генераторів, а також у пристроях вмикання і вимикання; надмірний знос підшипників електромашин, у результаті чого може відбутися або перегрів підшипників, або заклинювання їх, а потім загоряння. Найбільшу небезпеку вибуху і пожежі являє собою електроустаткування вибухо – пожежонебезпечних приміщень і пристроїв.

Пожежна безпека характеризує стан об'єкта, при якому виключається можливість виникнення і розвитку пожежі і впливу на людей небезпечних факторів пожежі, а також забезпечується захист матеріальних цінностей. ГОСТ 12.1.004-91.ССБТ. «Пожарная безопасность. Общие требования», встановлює такі засоби забезпечення пожежної безпеки:

- система запобігання пожежі;
- система протипожежного захисту;
- організаційно-технічні заходи.

Крім того, цей стандарт регламентує імовірність виникнення пожежі в електротехнічного виробу, що не повинне перевищувати  $10^{-6}$  у рік.

Також при підготовці рекомендацій з недопущення пожеж, була використана наступна література:

- НПО ГА-85 «Наставление по пожарной охране в ГА СССР», регламенти по технічному обслуговуванню і ряд стандартів:

- ДСТУ 0.01-1.01-95 «Правила пожежної безпеки в Україні»;
- ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. «Пожарная безопасность. Общие требования»;
- ГОСТ 12.1.010-76 «Взрывобезопасность. Общие требования»;
- ГОСТ 12.1.030-81. ССБ. «Электробезопасность. Защитное заземление, зануление»;
- ГОСТ 12.1.044-84 «Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения».

Запобігання пожежі досягається за рахунок недопущення утворення в пальному середовищі джерел запалювання. Такими джерелами при

експлуатації розроблювального приладу можуть стати його несправність, перевантаження або неправильний монтаж блоків системи, що перевіряється, що приводить до підвищеного нагрівання або до короткого замикання. Шляхом усунення цих причин, можна сказати, що конструкція задовольняє вимогам електростатичної безпеки відповідно до ГОСТ 12.1.018-93. ССБТ. «Пожароискробезопасность статического электричества». Слід зазначити, що при нормальних умовах експлуатації розроблювальний прилад не створює джерел загоряння.

Протипожежний захист забезпечується нанесенням на поверхню конструкції розроблювального приладу захисних фарб.

Організаційні технічні заходи містять у собі розробку інструкції про порядок роботи з розроблювальним приладом, дотримання протипожежного режиму і про дії оператора при виникненні пожежі.

Конструкція розроблювальної системи виключає можливість вибуху самої системи.

При виникненні пожежі, за даними категорії В необхідно використовувати на кожній одиниці виміру площі, що захищається, у 500-600 м<sup>2</sup>:

- вуглекислотний вогнегасник ВВК-2 – 2 шт.;
- вогнегасник водопінний аерозольний ВВПА-400 або вогнегасник водопінний ВВП-9 – 4 шт.

### ***Заходи при виникненні пожежі.***

Існує 4 способи припинення горіння: охолодження зони горіння або самих палаючих речовин; ізоляція реагуючих речовин від зони реакції; розведення реагуючих речовин у зоні реакції негорючими речовинами; хімічне гальмування реакції горіння.

При *першому способі* припинити горіння можна впливом на поверхню палаючих матеріалів вогнегасячими речовинами, а також охолодженням палаючих матеріалів методом їхнього перемішування. *Другий спосіб* полягає в створенні ізолюючого шару між зоною горіння і палаючих матеріалів або в прорізах приміщень, де відбувається пожежа. Для розведення повітря в нього вводяться негорючі пари і гази. (*третій спосіб*). З цією метою використовуються вуглекислий газ, водяна пара, азот, інші компоненти.

*Четвертий спосіб* реалізується подачею інгібіторів (речовин, що сповільнюють протікання хімічних реакцій або припиняють їх) на поверхню палаючих матеріалів або введенням їх у повітря, що надходить у зону реакції.

У цивільній авіації застосовують наступні вогнегасячі речовини: вода, повітряно-механічна і хімічна піни, інертні гази, галоїдовуглеводні сполуки, вогнегасячі порошки, комбіновані сполуки (сполучення порошкових і пінних сполук, водно-галоїдовуглеводні емульсії і т.п.).

### **4.3. Інструкція з охорони праці під час експлуатації проектного об'єкту.**

#### **4.3.1. Основні положення.**

1. Ця інструкція розроблена у відповідності з вимогами нормативних актів з охорони праці та обов'язкова до виконання усіма працівниками.

2. До роботи з проектованим об'єктом допускаються особи інженерно-технічної сполуки, що вивчили проектований пристрій, інструкцію з технічної експлуатації, дану інструкцію і ті, які склали залік по техніці безпеки і пожежної безпеки.

3. Працівник зобов'язаний:

- твердо знати і строго дотримуватись правил внутрішнього розпорядку, правил з охорони праці, не допускати на робочому місці паління і вжитку спиртних напоїв;

- на роботу з'являтися в призначений час, приймати участь у змінно-зустрічних зборах. Хворі та особи у нетверезому стані до роботи не допускаються і повинні бути відправлені у медичний заклад для перевірки стану здоров'я;

- знати, що основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі з електродвигуном є поразка електричним струмом, рухомі незагороджені елементи літака, виступаючі елементи АіРЕО (антени, датчики, ПВД та ін.), недостатній рівень освітлення у технічному відсіку.

#### **4.3.2. Вимоги до безпеки перед початком роботи.**

працівник зобов'язаний:

- надягти й упорядкувати робочий одяг, надягти головний убір і підібрати під нього волосся;

- перевірити оглядом технічний стан робочого місця, забрати з робочого місця усе, що може перешкодити роботі;

- перевірити справність устаткування, пристосувань, інструмента, вентиляції, місцевого освітлення. Не працювати на устаткуванні з простроченими термінами огляду.

#### **4.3.3. Вимоги до безпеки під час роботи.**

Для забезпечення безпечної організації праці працівник зобов'язаний:

- забезпечити відсутність людей в зоні переміщення підвісних елементів літака (закрилки, рульові поверхні) на протязі всього періоду робіт по обслуговуванню протиобліднювальної системи;
- не знаходитися поблизу автоматично діючих механізмів, не заходити за огорожу, не знімати та не встановлювати огорожу під час їх роботи;
- переміщатися та оглядати АіРЕО з землі необхідно згідно з розробленими та затвердженими безпечними маршрутами обходу літака, які виключають можливість зіткнення інженерно-технічного складу з виступаючими або рухомими частинами літака;
- не допускається при експлуатації електродвигуна встановлювати запобіжники, які не відповідають номіналу, а також закорочувати їх дротом;
- при виконанні робіт суворо керуватися технологічними вказівками по тій або іншій перевірці;
- забороняється підключати або відключати роз'єми, які знаходяться під струмом;
- періодично необхідно перевіряти надійність з'єднання штепсельних роз'ємів;
- при знаходженні пошкодження ізоляції з'єднувальних кабелів знеструмити електродвигун і відправити його в ремонт;
- огляд, наладку, чистку, змазку, догляд та ремонт електродвигуна виконувати після його повної зупинки та відключенні;
- не притулятися до струмопровідних частин;

- забезпечити достатній рівень природного або штучного освітлення при виконанні робіт в технічному відсіку. Штучне освітлення повинно відповідати вимогам стандарту ГОСТ 5472003-82, а саме: освітлювальні прилади для загального та місцевого освітлення повинні забезпечувати нормовані кількісні та якісні характеристики для освітлювальних пристроїв. Їх вибір слід проводити у відповідності з вимогами СНІП-4-79. Світильники місцевого освітлення повинні оснащуватись світлорегуляторами. Повинні дотримуватись норми освітленості: при загальному освітленні – 300 лк, при комбінованому – 700 лк;

- до робіт на літаку слід приступати при умові виконання вимог галузевого стандарту ГОСТ 5471004-82 і після приєднання корпусу літака до стаціонарного заземлюючого пристрою на стоянці літаків;

- підключення наземних джерел електричної енергії до бортової електричної мережі літака, а також їх відключення виконувати у відповідності з вимогами ГОСТ 5430030-84;

- забороняється використовувати у якості переносних електричних освітлювальних пристроїв – освітлювачів напругою 220 В, а також освітлювачів, не обладнаних захисним склом (сіткою);

- при наявності підвищеного рівня шумів на робочому місці необхідно застосовувати шумоподавляючі навушники;

- використовувати захисні окуляри, сітки, каски і іншими захисними пристроями при виконанні усіх видів робіт, які супроводжуються відлітанням осколків;

- при виникненні виробничої ситуації, небезпечної для життя чи здоров'я працюючих, роботи повинні бути негайно припинені і виконавець робіт повинен повідомити безпосереднього керівника.

#### **4.3.4. Вимоги до безпеки після закінчення роботи.**

По закінченню роботи працівнику необхідно:

- у встановленому порядку вимкнути обладнання, пристрої та апаратуру, всі перемикачі встановити в початкове положення, знеструмити електродвигун. Або передати зміну при безперервному процесі;
- прибрати відходи виробництва;
- після закінчення робіт необхідно прийняти душ, використовуючи резинове взуття на неслизькій підшві для запобігання падіння;
- повідомити керівника про всі недоліки, що виявилися у процесі роботи.

#### **4.3.5. Вимоги до безпеки в аварійних ситуаціях.**

Знеструмити устаткування, припинити роботу, з'явитися в розпорядження старшого зміни і докласти про подію.

Основними причинами виникнення пожежі при проведенні ТЕ обладнання є:

- короткі замикання елементів ланцюгів;
- встановлення запобіжників, що не відповідають номіналові;
- неправильний вибір проводів у схемі підключення;

Для попередження виникнення пожежі пропонуємо вжити заходів по кожному з перерахованих вище пунктів, а саме:

- періодично перевіряти надійність роз'ємів, особливо в місцях з'єднання проводів зі штепсельними розніманнями. Місця підключення до зовнішніх пристроїв надійні по міцності і пайці;
- не встановлювати «жучки» і запобіжники, що не відповідають номіналові;
- зробити перевірку правильності вибору сполучних проводів.

У випадку виникнення пожежі застосовувати вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-2 або водопінний аерозольний типу ВВПА-400. Рекомендується встановити в лабораторії не менше 2-х вогнегасників.

### **Висновок.**

В результаті проведеного аналізу робочого місця інженера з технічного обслуговування повітряного судна, були визначені шкідливі та небезпечні фактори. Описано природне освітлення, виробничий шум, мікроклімат. Було проведено розрахунок природного освітлення. Встановлено, що КПО = 0,6 % є недостатнім для заданого розряду зорової роботи. Для забезпечення відповідного рівня освітленості в проектному відділі рекомендується встановити світильники з світлодіодними лампами.



## 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 5.1. Аналіз впливу техногенних чинників на навколишнє природне середовище.

Перехід людства від використання примітивних знарядь праці до техногенної цивілізації призвів до значних негативних наслідків. Зокрема, він виявився деструктивним стосовно природи. Екосистеми (від гр. *oikos* – оселя, середовище) планети – атмосфера, гідросфера, літосфера і біосфера – зазнали руйнівного впливу людини.

Екологічна безпека – це такий стан навколишнього середовища, коли гарантується запобігання погіршення екологічної ситуації та виникнення небезпеки для здоров'я людини.

XX століття породило проблеми, які торкаються не окремих держав, або регіонів, але й людство загалом. Надзвичайного загострення набули відносини людини й природи. Людська цивілізація впродовж усієї своєї історії користувалася природою екстенсивно, постійно підвищуючи навантаження на довкілля.

Використання природних ресурсів значною мірою позначилося на якості життя людей, проте економічне зростання, зорієнтоване на кількісні показники, зрештою призвело до колосального забруднення навколишнього середовища, а подекуди до незворотних наслідків, змінюючи характеристики Землі.

Впродовж минулого століття температура на планеті підвищилася на 0,6°C, що є наслідком так званого парникового ефекту. Повітря забруднюють ще кілька десятків сполук та газів – передусім метан, двоокис азоту, двоокис вуглецю, що використовується під час виробництва мінеральних добрив,

Кафедра авіоніки					НАУ 19 07 83 000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	Літ.	Арк.	Аркушів
Виконав		Піскур'ов В. А.						
Керівник		Слободян А.П.					105	
Консульт.		Слободян А.П.				173 Авіоніка		
Н. Контр.		Левківський В.В.						
Заф.каф..		Павлова С.В.						

спалюванні твердого палива та різні фтор-хлор-вуглецеві сполуки. Викиди двоокису вуглецю нині становлять понад 50% і за обсягом значно випереджають всі інші шкідливі для клімату викиди.

Підвищення концентрації супутніх газів в атмосфері негативно впливає на кількість атмосферного озону, тобто стає причиною появи "озонових дір". Хімічні речовини, що виснажують озоновий шар й викликають глобальне потепління, також стають причиною забруднення і нижнього атмосферного шару, породжуючи кислотні дощі та інші побічні ефекти забруднення повітря. Кліматичні зміни, пов'язані з глобальним потеплінням, "озоною дірою", кислотними дощами загрожують погіршенням погодних умов, сприятливих для землеробства. Це, у свою чергу, може вплинути на продовольчу проблему, породжуючи нові фактори нестабільного існування та конфліктів.

Ядерні випробування в атмосфері призвели до того, що Земля загорнулася у суцільну радіоактивну плівку. Радіація накопичується у ґрунті, воді, рослинах, живих організмах, спричиняючи незворотні зміни. Існують ядерні "поховання", де скидають надзвичайно радіоактивні відходи – радіоактивність ґрунту в таких районах у п'ятнадцять разів вища, ніж на Фукусіма-1. На дні океанів лежать, неначе бомби уповільненої дії, затоплені ракети з отруйними речовинами, уламки ядерних реакторів тощо.

Військова промисловість споживає величезну кількість найціннішої сировини. Кожен новий вид зброї потребує надзвичайних матеріальних витрат, які можна було б використати на користь суспільству – в тому числі на охорону навколишнього середовища. Гонка озброєнь, крім того, що є бездумним розтринькуванням економічних ресурсів і наукового потенціалу, породжує найбільшу загрозу для навколишнього середовища й існування людства – загрозу ядерної катастрофи.

Від нерозсудливості людської діяльності також страждає біологічна ресурсна база. Обмеження біологічної розмаїтості відбувається дедалі швидше. Виснажуються не лише родючі землі, але й втрачаються окремі види їжі,

лікарських рослин, деякі види тваринного світу. Особливо значних масштабів набула вирубка лісів, оскільки нерідко руйнується родючий шар землі поруч із вирубками, активізується ерозія ґрунтів і, що найнебезпечніше, збільшується концентрація вуглецю в атмосфері, що призводить до посилення парникового ефекту і глобального потепління клімату.

Важлива для людства проблема – охорона геологічного середовища, тобто верхньої частини літосфери, яка розглядається як багатокомпонентна динамічна система, що перебуває під впливом інженерно-господарської діяльності людини і, в свою чергу, певною мірою визначає цю діяльність. Найголовніший компонент геологічного середовища – гірські породи, що містять нарівні з твердими мінеральними і органічними компонентами газу, підземні води. Особливо великий негативний вплив на довкілля від техногенних катастроф, найбільша з яких у XX ст. – на Чорнобильській атомній електростанції – сталася в Україні.

Сучасний екологічний стан України характеризується показниками, які викликають серйозне занепокоєння. Під загрозою джерела питної води. Найбільш забруднена вода у басейні Дніпра, на півдні України й Криму. Численні водойми забруднені, а інші переживають біологічну деградацію. У критичному стані низка південних прибережних районів Чорного й Азовського морів. Щорічно близько 12,5 мільярда кубометрів стоків, у тому числі два мільярди неочищених, потрапляють у Чорне море. Забруднення нечистотами Азовського моря також значне (4 мільярда кубометрів, з яких 1,9 мільярда - неочищені).

Ріка Дніпро, яка є джерелом питної води для більш ніж 70% населення України, забруднюється комунальними, промисловими та сільськогосподарськими стоками. Вода річки також уражена радіацією. Крім проблем якості води, має місце хронічна нестача питної води у південних та південно-східних районах, а також у Криму. Скорочення запасів питної води в

Криму вже призвело до спалаху низки інфекційних захворювань, в тому числі холери.

Високим є рівень забруднення повітря – особливо у містах та промислових районах. Головні джерела забруднення повітря – металургійні, автохімічні та нафтохімічні підприємства, а також електростанції. У найбільш уражених регіонах середня концентрація шкідливих для здоров'я людей речовин в атмосфері до 5 разів перевищує рівні індустриальних країн.

Величезна промислова зона у Донецько-Дніпровському регіоні є однією із найнебезпечніших для навколишнього середовища не лише України, але й загалом Європи. Вона охоплює 18,6% території України, де проживає 28% населення. Викид у повітря шкідливих речовин становить тут понад 70%. Близько 71% земель знищено, а забруднення ґрунтів хімічними добривами та пестицидами надзвичайно високе. Також забруднена одна шоста підземних вод.

## **5.2. Вплив матеріалів, що використовуються при виготовленні цифрового радіовисотоміра на навколишнє середовище.**

### **5.2.1 Вплив виробництва пластмасових виробів.**

За останні десятиліття в промисловості різко зросла використання полімерних матеріалів. До теперішнього часу воно досягло колосальних розмірів, а перспективи їх виробництва і застосування постійно розширюються. Так в процесі виробництва пластмасових виробів в атмосферу виділяється щорічно мільярди тонн різних шкідливих речовин: пил і аерозолі (дими), пари та аерозоль пластифікатора і технологічних добавок, пари стиролу (наприклад у ABS пластику) або нітрит акрилової кислоти, ціаністого водню і окису вуглецю, емісія при нагріванні, вакуумування і формуванню, пари розчинників, аміак, дибутилфталат, метиловий спирт, полімер ВХ і інші.

Найбільш шкідливими і важковиделяємі в даному списку забруднень є пари стиролу і різних розчинників. Концентрація стиролу і розчинників в

вентиляційних викидах при виробництві виробів з полімерних матеріалів (обробці пластиків) досягає 500 мг / м<sup>3</sup> повітря!

При нагріванні понад 1400С можливе виділення в повітря летких продуктів термоокислительной деструкції, що містять органічні кислоти, карбонільні з'єднання, в тому числі формальдегід, ацетальдегід і оксид вуглецю. Поряд з цими забруднювачами при литті, пресуванні і механічній обробці деталей з пластмасового сировини утворюються відходи у вигляді облоя литника, стружки і тирси. Все це негативно впливає не тільки на навколишнє середовище, але і на здоров'я людини. Дрібний пил полімеру при вдиханні та в легені може викликати уповільнені фіброзні зміни в них. Дія пилу на шкірний покрив зводиться в основному до механічного подразнення. Бісфенол А, який може вивільнятися при контакті деяких пластмасових виробів з гарячими рідинами, згідно дослідникам західних вчених, викликає гормональні порушення, що в результаті веде до ожиріння, безпліддя, раннього статевого дозрівання, значно збільшує ймовірність розвитку онкологічних захворювань мономер ВХ є канцерогенною речовиною і при тривалому впливі на людину може бути причиною важких захворювань. Ці речовини несприятливо впливають на кругообіг багатьох компонентів на Землі. Забруднюючі і отруйні речовини переносяться на великі відстані, потрапляють з опадами в ґрунт, поверхневі і підземні води, в океани, отруюють навколишнє середовище, негативно позначаються на отриманні рослинної маси. Відходи пластичних мас доцільніше направляти на повторну переробку, так як утилізація супроводжується утворенням надзвичайно токсичних діоксинів.

Розвиток виробництва пластмасових виробів з кожним роком йде все швидше і швидше. Отже, негативний вплив на навколишнє середовище значно збільшується. Якщо не вживати заходів щодо зниження цього шкідливого впливу, то в недалекому майбутньому наша планета буде непридатною для існування.

### **5.2.2 Процес механічної обробки металів як джерело забруднення навколишнього середовища.**

Сучасне машинобудування розвивається на базі великих виробничих об'єднань, що включають заготівельні цехи, цехи термічної обробки металів, цехи покриттів і велике ливарне виробництво. В процесі виробництва ЛА та устаткування широко використовують механічну обробку металів. Більшість деталей ЛА виготовляється шляхом обробки різанням. Заготовками таких деталей служать прокат, виливки, поковки, штампування та ін. Процес обробки деталей різанням заснований на утворенні нових поверхонь шляхом деформування і подальшого відділення поверхневих шарів матеріалу з утворенням стружки. Залежно від характеру виконуваних робіт і виду ріжучого інструменту розрізняють наступні методи обробки металів різанням: точіння, фрезерування, свердління, зенкування, протягування, і ін.

Точіння - операція обробки тіл обертання, гвинтових і спіральних поверхонь різанням за допомогою різців на верстатах токарної групи. При точінні заготівлі повідомляється обертальний рух, а різального інструмента - повільне поступальний переміщення в поздовжньому або поперечному напрямку.

Фрезерування - високопродуктивний і поширений процес обробки матеріалів різанням, що виконується на фрезерних верстатах. Головне (обертальний) рух отримує фреза, а рух подачі в поздовжньому напрямку - заготівля.

Свердління - операція обробки матеріалу різанням для отримання отвори. Ріжучим інструментом служить свердло, яка вчиняє обертальний рух різання і осьове переміщення подачі. При обробці стали на свердлильному верстаті утворюється стружка, виділень пилу немає, при обробці чавуну виділяється пил кодується як оксид заліза.

Шліфування - процес чистової і оздоблювальної обробки деталей машин і інструментів за допомогою зняття з їх поверхні тонкого шару металу

шліфувальними кругами, на поверхні якого розташовані абразивні зерна. Характерною особливістю процесів механічної обробки є утворення відходів у вигляді твердих частинок (промислового пилу), а в разі застосування мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) - аерозолів масла і емульсолів. Джерелами утворенню та виділенню забруднюючих атмосферу речовин є різні металорізальні і абразивні верстати. Інтенсивність утворення забруднювачів залежить, зокрема, від таких чинників:

- виду оброблюваного матеріалу
- режиму обробки
- продуктивності і потужності обладнання
- геометричних параметрів інструменту і оброблюваних виробів
- від витрати МОР.

При обробці металів без охолодження найбільшим пиловиділенням супроводжуються процеси абразивної обробки металів: зачистка, полірування, шліфування та ін., що утворюється при цьому пил на 30-40% по масі представляє матеріал абразивного круга і на 60-70% - матеріал виробу. Інтенсивність пиловиділення при цих видах обробки пов'язана, в першу чергу, з величиною абразивного інструменту та деяких технологічних параметрів різання. При обробці повстяними і матер'яними колами утворюється повстяна (вовняна) або текстильна (бавовняна) пил з домішкою поліруючих матеріалів.

Таким чином, при механічній обробці металів виділяється не мала кількість шкідливих речовин, які в свою чергу впливають на здоров'я людини. Для їх скорочення необхідно провести ряд заходів, так наприклад установка пиловловлюючого обладнання, поліпшення системи вентиляції тощо.

### **5.2.3 Деякі аспекти впливу міського шуму на здоров'я людини і шляхи зниження його негативного впливу.**

Наше століття стало найгучнішим. Важко зараз назвати область техніки, виробництва і побуту, де в звуковому спектрі не був присутній би шум, тобто заважає нам і дратує нас суміш звуків.

За певний комфорт, зручності зв'язку та пересування, благоустрій побуту і вдосконалення виробництва сучасній людині доводиться слухати вже не скрип возів і лайка візників, а виття автомобілів, брязкіт трамваїв, торохтіння мотоциклів і вертольотів, рев реактивних літаків. За останні десятиліття проблема боротьби з шумом в багатьох країнах стала однією з найважливіших. Впровадження в промисловість нових технологічних процесів, зростання потужності і швидкохідності технологічного устаткування, механізація виробничих процесів призвели до того, що людина у виробництві і в побуті постійно піддається впливу шуму високих рівнів.

Боротьба з шумом, є комплексною проблемою. Довгий час вплив шуму на організм людини спеціально не вивчалась. Завдяки багатьом дослідженнями з'ясувалося, що він надає повільний, але надзвичайно згубний ефект. Крім того, що підвищений рівень шуму є причиною зниження слуху, погіршення продуктивності праці, порушення концентрації уваги, підвищення кров'яного тиску, він також впливає і на наше ставлення один до одного. Під впливом гучних звуків люди поведуться агресивніше: 70% неврозів виникає саме через шум. Людина емоційно виснажується. Не знаючи, як заповнити свої ресурси, він знову насичує себе уявним відпочинком (радіо, телевізор, комп'ютер). В результаті виникає психічний дисбаланс, накопичується агресія і людина зривається на близьких, підлеглих, що оточують його людей. На ступінь психологічної та фізіологічної сприйнятливості до шуму впливають тип вищої нервової діяльності, характер сну, рівень фізичної активності, ступінь нервового і фізичного перенапруження, шкідливі звички (алкоголь і куріння). Звукові подразники створюють передумову для виникнення в корі головного



мозку вогнищ застійного збудження або гальмування. Це веде до зниження працездатності, в першу чергу розумовою, так як зменшується концентрація уваги, збільшується число помилок, розвивається стомлення.

Для виявлення негативного впливу шуму на здоров'я і самопочуття жителів нашого міста, особливо тих які проживають поблизу джерел шуму (автомагістралі, залізничні колії, виробничі корпуси і т.д.) було проведено анкетування. За результатами опитування можна сказати, що переважна частина жителів вважає себе відносно здоровими, але в той же час у більшості з них є хронічні захворювання. На питання впливає на Вас міський шум, думки людей розділилися: 45,2% вважають, що шум негативно впливає на самопочуття і здоров'я людини, 40% вважають, що шум надає несуттєве вплив, а інші 14,8%, живуть довгий час поруч з джерелом шуму, адаптувалися і майже не відчують його впливу.

Постійний вплив шуму вище природного викликає підвищену стомлюваність і виникнення неврозів, як відзначили опитані. Також були скарги на підвищену втома, головний біль, підвищення артеріального тиску, погіршення сну. На питання, який вид транспорту створює найбільший шум, 48% вибрали вантажний, 40% - залізничний, інші 12% - легковий, а пасажирський транспорт, на думку опитаних, створює незначне шумове забруднення. Найбільше роздратування у жителів викликає постійний шум. Переривчастий і інтенсивний шуми надають значно менший вплив.

В якості найбільш ефективного методу зниження транспортного шуму опитаними були обрані варіанти: застосування засобів звукозахисти і зменшення шуму в джерелі його виникнення.

Останнім часом автомобілі є переважаючим джерелом інтенсивного і тривалого шуму. Тому для зниження шумового рівня жителі міста майже одноголосно запропонували поліпшити якість дорожнього полотна і знизити інтенсивність транспортного потоку.

Крім того, найбільш доступним і екологічним методом боротьби з шумом є створення смуги шумозащитного озеленення. Таке озеленення створюють на ділянках доріг, що проходять через населені пункти або поблизу них, через угіддя, призначені для вирощування цінних сільськогосподарських культур та ін. Як шумозащитного озеленення використовують щільну багаторядну посадку спеціально підібраних деревно-чагарникових порід, які є ефективним перешкодою на шляху поширення шуму, вихлопних газів і скупченню на дорожньому покритті пилу. З цього приводу опитані відповіли, що краще знижують рівень шуму дерева і чагарники, посаджені вздовж доріг.

## ВИСНОВОК

При виконанні роботи були розглянуті питання принципів вимірювання висоти радіовисотоміром з лінійної частотної модуляцією. Проведено огляд загальних відомостей про радіовисотомір з ЛЧМ. Розглянуто принципи та методи вимірювання висоти типовими бортовими радіовисотоміру. Розглянуто структуру спектра сигналу биття радіовисотомір, а також вивчені основні причини спотворення спектра (кутові еволюції ЛА, вплив ефекту Доплера внаслідок наявності швидкості ЛА і т.п.).

В роботі розглянуті основні принципи моделювання поверхонь і визначено найбільш зручний варіант для роботи - фацетная модель. Розглянуто параметри, що впливають на опис земної поверхні і проведено огляд типів лісів, що зустрічаються у великих країнах світу. Вивчено можливості моделювання різних поверхонь за допомогою математичного пакета і за допомогою графічної програми тривимірної візуалізації.

В основу проекту обраний математичний пакет MatLAB, за допомогою якого була створена математична модель спектру сигналу биття радіовисотомір. Ця модель реалізована у вигляді «\*\*\*. М» - файлу і являє собою програму, яка обробляє вхідні (задані користувачем) параметри, такі, як: справжня висота польоту, ширина ДОР і ДНА, наявність кутових еволюцій ЛА, наявність швидкості. Також користувач має можливість задати кількість розраховуються фацетів і змінити параметри відображення графіка спектра сигналу биття, який є результатом виконання програми.

На основі цієї, базової, програми була розроблена програма, що дозволяє задавати кілька шарів фацетів, причому для кожного шару можна задавати унікальні параметри (середня висота фацетів шару, дисперсія фацетів по висоті, розмір і кількість фацетів шару, коефіцієнт відображення і т.п.). Ця програма вийшла в результаті розробки файлу-функції «layer.m», яка обчислює параметри фацетів для одного шару. Основна програма, завдяки цій

доопрацюванні стала менше і наочніше. Крім того, вона стала універсальною, що стало в нагоді при подальшому дослідженні.

Для наступного етапу роботи нам знадобилася програма 3D Studio MAX, вона як найкраще підходить для розробки методів створення поверхонь. Ця програма дозволяє експортувати координати контрольних точок об'єктів сцени.

Перетворивши експортовані дані до зручного для подальшої обробки в математичному пакеті увазі, вдалося за допомогою MatLAB створити новий файл-функцію «layer3D.m», результатом виконання якої є такі ж дані, як і у функції «layer.m», але новий файл бере за основу дані, експортовані з 3Ds MAX. Слід зазначити, що процес перетворення координат об'єктів до виду, що дозволяє проводити обробку в MatLAB, вимагає автоматизації шляхом створення відповідної програми. В рамках даного дослідження для цього був використаний пакет Microsoft Office.

На закінчення слід сказати що вимірювання висоти над лісовою поверхнею є маловивченим напрямком радіовисотометрії і вимагає глибокого опрацювання програмних і апаратних засобів. Якщо подивитися на спектри соснового, ялинового і пальмового лісів, то тут досить характерно спостерігається два максимуми: один відповідає середньому рівню зеленої частини дерев, а другий - ґрунтовому шару. Крім того, найвищі частини дерев можна визначити за найменшою частоті спектру, хоча в реальних умовах це важко внаслідок наявності шумів і перешкод. Однак цю частоту можна визначити, застосувавши, наприклад будь-якої алгоритм апроксимації обвідної переднього фронту спектра сигналу биття.

З точки зору забезпечення безпеки польотів на малій висоті, було б цікавим рішення, при якому пілот ЛА буде отримувати в якості даних від радіовисотомір два або навіть три значення висоти: висота, що відповідає ґрунтовому шару, висота, що відповідає верхівкам дерев і висота, що відповідає зеленої частини дерев. В цьому випадку пілот матиме можливість більш повного аналізу підстильної поверхні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ануфриев И.Е. MATLAB 7 / Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.: ил.
2. Бадриев И.Б. Разработка графического пользовательского интерфейса в среде MATLAB. Учебное пособие / И.Б. Бадриев, В.В. Бандеров, О.А. Задворнов. – Казань: Казанский государственный университет, 2010. – 113 с.
3. Боков А.С. Имитатор отраженных сигналов для радиовысотомеров / А.С. Боков, В.Г. Важенин, Н.А. Дядьков, В.В. Мухин, Б.В. Храмцов, Д.Е. Щербаков // Радиовысотометрия – 2007: Сборник трудов Второй научно-технической конференции / отв. ред. А.А. Иофин, Л.И. Пономарёв. Екатеринбург : ИД «Третья столица», 2007. 400 с. С. 380–384.
4. Боков А.С. Методы имитации отраженных сигналов в раскрыве приемных антенн автономных бортовых радиовысотомерных систем / А.С. Боков, В.Г. Важенин, Н.А. Дядьков, В.В. Мухин, Л.И. Пономарев // Радиолокация, навигация, связь: труды XV международной научно-технической конференции. Воронеж, 2009. С. 1548–1554.
5. Боков А.С. Оценка качественных характеристик бортовых радиовысотомеров / А.С. Боков, В.Г. Важенин, Н.А. Дядьков, А.А. Иофин, В.В. Мухин, Д.Е. Щербаков // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. Т. 1. Пенза : ПГУ, 2010. С. 16–18.
6. Боков А.С. Построение бортовых навигационных измерителей при малых пространственных интервалах наблюдения / А.С. Боков, В.Г. Важенин, Н.А. Дядьков, В.С. Лузин, Л.И. Пономарев // Оборонная техника, М. 2001. № 6–7. С. 5–9.

7. Боков А.С. Применение фацетной модели для имитации радиолокационного сигнала, отраженного от подстилающей поверхности / Боков А.С., Важенин В.Г., // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. Т. 7. 2012. 160 с. С. 55-61. 160 с. 7 с.
8. Боков А.С. Формирование входного сигнала радиовысотомера с ЛЧМ, имитирующего отражение от протяженной поверхности / А.С. Боков, В.Г. Важенин, А.С. Вершинин, Н.А. Дядьков // Радиовысотометрия – 2007: сборник трудов Второй НТК; отв. ред. А.А. Иофин, Л.И.Пономарев. Екатеринбург : ИД «Третья столица», 2007. С. 342–348.
9. Важенин В.Г. База данных отражающих характеристик покровов и поверхностей / В.Г. Важенин [и др.] // Радиолокация, навигация связь : труды X международной научно-технической конференции 13-15 апреля 2004 г. Т.3. Воронеж : НПФ «САКВОЕЕ», 2004. С. 1714–1721.
10. Важенин В.Г. Возможности использования ЧМРВ малых высот для измерения параметров морского волнения / В.Г. Важенин, М.М. Кокин, Л.И. Пономарев // Проблемы радиолокации протяженных объектов. Сборник научных трудов. Свердловск : изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1982, С. 134–142.
11. Важенин В.Г. Экспериментальное исследование статистических характеристик отраженного и переотраженного сигналов от водной поверхности на малых дальностях / В.Г. Важенин [и др.] // Антенны и НВЧ-узлы радиотехнических устройств. Свердловск : УПИ им. С.М. Кирова, 1976. С. 109–115.
12. Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>
13. Виноцкий А.С. Автономные радиосистемы : учебн. пособ. для вузов / А.С. Виноцкий. М. : Радио и связь, 1986. 336 с.

14. Гринев А.Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.: ил. (сер. Радиолокация).
15. Данюлис Е.П. Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве / Е.П. Данюлис, В.М. Жирин, В.И. Сухих, Р.И. Эльман. – М.: Агропромиздат, 1989. – 223 с.: ил.
16. Дядьков Н.А. Имитатор отраженного сигнала для радиовысотомеров / Н.А. Дядьков, А.А. Калмыков, В.С. Кубланов, Б.И. Судаков // АС No 1097073 от 09.07.82.
17. Дядьков Н.А. Имитатор сигналов для РЛС / Н.А. Дядьков, А.А. Калмыков, В.С. Кубланов, Б.И. Судаков, А.И. Сиротин, Ю.П. Горяев. АС No 1263055 от 08.06.86.
18. Жуковский А.П. Теоретические основы радиовысотометрии / А.П. Жуковский, Е.И. Оноприенко, В.И. Чижов // отв. ред. А.П. Жуковский. М. : Сов. радио, 1979. 320 с.
19. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности / С.Г. Зубкович. М. : Сов.радио, 1968. 224 с.
20. Келли Мэрдок. Autodesk 3ds Max 2013. Библия пользователя / Келли Мэрдок. – Киев, «Диалектика-контакт», 2013. – 816 с.
21. Коган И. М. Ближняя радиолокация (теоретические основы). / Коган И. М. – М. : Сов. радио, 1973. 272 с.
22. Колчинский Е.В Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. / Колчинский Е.В., Мандуровский И.А.,

Константиновский М.И. // Под ред. В.Е. Колчинского. М., «Сов. радио», 1975, 432 с.

23. Коростелев А.А. Теоретические основы радиолокации: Учебн. пособие для вузов / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.; Под ред. В.Е. Дулевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., Сов. радио, 1978. – 608 с.

24. Мельник Ю.А. Радиолокационные методы исследования земли / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович [и др.] / отв. ред. Ю.А. Мельник. М. : Сов. радио, 1980. 264 с.

25. Радиовысотомер А-052. Руководство по технической эксплуатации. МАВИ 461531.002 РЭ.

26. С.В. Поршнева. MATLAB 7. Основы работы и программирования. Учебник – М.: ООО «Бином-пресс», 2011. – 320 с.: ил.

27. Сколник М. Справочник по радиолокации в 4-х т. Т. 1. Основы радиолокации. / М. Сколник. Пер. К.Н. Трофимова. М. : Сов. Радио, 1976. 456 с.

28. Скрыпник О.Н. Радионавигационные системы воздушных судов: Учебник / О.Н. Скрыпник. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 348 с.:

29. Трухин М.П. Математическое моделирование сигналов в радиотехнических устройствах и системах: учебное пособие / М.П. Трухин. – Екатеринбург: УрФУ, 2013 – 238 [2] с.

30. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с., ил.

31. F.T. Ulaby, M.C. Dobson “Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain”, ARTECH HOUSE, 1989.



## Лістинг основної програми

```

%=====
clear all; % очистка памяти
%=====
% задаем исходные параметры
H0=200;
DNA=40;
DOR0=15;
KREN = 0;
TANG = 0;
alp = 5;
F0 = 4200 * 10^6;
T0 = 0.02;
dF = 100 *10^6;
VV = 0;
VH = 00;
P0 = 1;
step = 1;
Hmin = 0.7;
Hmax = 1.3;
Hstep = 25;
varDNA =1;
varDOR = 1;
%высота ЛА (10...1500 м)
%ширина диаграммы направленности антенны, градусы
%диаграмма обратного рассеяния факетов, градусы
%значение крена ЛА в градусах
%значение тангажа ЛА в градусах
%среднеквадратическое отклонения нормали факета от вертикали
%Рабочая частота РВ
%период девиации частоты ЛЧМ
%значение девиации частоты ЛЧМ
%Вертикальная скорость
%Горизонтальная скорость
% мощность передатчика
%шаг сетки факетов
%Коэффициент нижней границы диапазона построения спектра
%Коэффициент верхней границы диапазона построения спектра
%Шаг построения графика, Гц
%Коэффициент, показывающий тип аппроксимации ДНА
%Коэффициент, показывающий тип аппроксимации ДЗР
%1 - Гаусс
%2 - cos(x)/(x+1)

%3 - sin(x)/x

%=====
%Дополнительные входные параметры для настройки слоев
%слой 0 - почва
dh0 = 0.5; %уровень дисперсии данного слоя (нормальное распределения)
dH0 = 0; %средний уровень высоты в данном слое
dDOR0 = 3; %уровень Прироста ДЗР для слоя 0 (равномерное распределение)
Pi0 = 0.9; %Средний уровень коэффициента отражения для слоя
alp0 = 1; %коэффициент максимального угла отклонения нормали факета от вертикали
dstep0 = 1; %Коэффициент шага для слоя 0
%слой 1 - подлесок
dh1 = 1; %уровень дисперсии данного слоя (нормальное распределения)
dH1 = 3; %средний уровень высоты в данном слое
dDOR1 = 0; %уровень дисперсии ДЗР для слоя (нормальное распределения)
Pi1 = 0.5; %минимальный уровень коэффициента отражения для слоя
alp1 = 2; %коэффициент максимального угла отклонения нормали факета от вертикали
dstep1 = 1.5; %Коэффициент шага для слоя
%слой 2 - зеленая часть растительности
dh2 = 10; %уровень дисперсии данного слоя (нормальное распределения)
dH2 = 18; %средний уровень высоты в данном слое
dDOR2 = 10; %уровень дисперсии ДЗР для слоя (нормальное распределения)
Pi2 = 0.6; %минимальный уровень коэффициента отражения для слоя
alp2 = 3; %коэффициент максимального угла отклонения нормали факета от вертикали
dstep2 = 1; %Коэффициент шага для слоя
%=====
[R1, Hd1, P1, FVdop1, FHdop1] = layer(H0, DNA, DOR0, KREN, TANG, alp, F0, P0, step, varDNA, varDOR, VH,
VV, dh0, dH0, dDOR0, Pi0, alp0, dstep0);
[R2, Hd2, P2, FVdop2, FHdop2] = layer(H0, DNA, DOR0, KREN, TANG, alp, F0, P0, step, varDNA, varDOR, VH,
VV, dh1, dH1, dDOR1, Pi1, alp1, dstep1);
[R3, Hd3, P3, FVdop3, FHdop3] = layer(H0, DNA, DOR0, KREN, TANG, alp, F0, P0, step, varDNA, varDOR, VH,

```

```

VV, dh2, dH2, dDOR2, Pi2, alp2, dstep2);
R = [R1, R2, R3];
Hd = [Hd1, Hd2, Hd3];
P = [P1, P2, P3];
FVdop = [FVdop1, FVdop2, FVdop3];
FHDop = [FHDop1, FHDop2, FHDop3];
k = length(R);
%=====
%Расчет частот биений для каждой линии наклонной дальности
%Рассчитаем массив времен задержки: прохождение сигнала ЛА-фацет-ЛА
Tz = 2*R / (3*10^8);
%Рассчитаем скорость изменения частоты девиации ЛЧМ
T0 = 2*H0 / (3*10^8);
VdF = (dF) / (T0*3333);
%Рассчитаем массив частот сигнала биений
Fb = VdF * Tz + FVdop + FHDop;
%=====
%Расчет спектра. Спектр рассчитаем следующим образом: Определим диапазон
%частот сигнала биений и искусственно его расширим при помощи заданных
%коэффициентов Hmin и Hmax.
%Далее пройдем по этому частотному диапазону. Исследовать
%будем отрезки длиной Hstep. Проверяем, какие значения частот биений попадают
%в текущий частотный промежуток и суммируем мощности отраженных сигналов для
%этих частот.
%=====
%Расчет границ частотного диапазона
minFb = Hmin*H0*2*VdF / (3*10^8); %нижняя граница частотного диапазона
maxFb = Hmax*H0*2*VdF / (3*10^8); %верхняя граница частотного диапазона
%=====
n=0; %счетчик составляющих спектра
for i = minFb : (Hstep) : maxFb %перебираем частотные отрезки
    n = n+1 ;
    Pg0(n) = 0;
    Fg(n) = i;
    for j = 1 : k
        %инкрементируем счетчик составляющих спектра
        %задаем начальную мощность для отрезка, равную 0
        %записываем в массив частот значения, кратные Hstep
        %перебираем все полученные ранее частоты биений
        %проверяем, попадает ли частота в исследуемый отрезок
        if Fb(j) < i
            if Fb(j) >= (i-Hstep)
                Pg0(n) = Pg0(n) + P(j); %суммируем мощности для каждого частотного отрезка
            end
        end
    end
end
Hg = (Fg*3*10^8) / (2*VdF); %Расчет "высотной" горизонтальной оси графика
Pg = Pg0 / (max(Pg0)); %нормировка
%найдем ширину спектра по уровню половинной мощности
for j = 1:n
    if Pg(j) > 0.5
        Pgmax = j;
    end
end
for j = n:-1:1
    if Pg(j) > 0.5
        Pgmin = j;
    end
end
deltaF = Fg(Pgmax) - Fg(Pgmin); %Ширина спектра по частоте
deltaH = Hg(Pgmax) - Hg(Pgmin); %ширина спектра по высоте
%=====
%Построение графика
subplot(2,1,1); %задание верхнего графика в одном окне
plot(Fg, Pg); %построение графика спектра "Мощность от Частоты"
xlabel('Частота биений Fb, Гц'); %Подпись горизонтальной оси
ylabel('Мощность, P'); %Подпись вертикальной оси
grid on; %Включить вспомогательные линии
title(['Количество фацетов = ' num2str(k) '; ширина спектра по уровню 0.5 = ' num2str(deltaF) ' Гц']);
axis([minFb, maxFb, 0, 1]); %ограничим область построения
subplot(2,1,2); %задание нижнего графика в одном окне
plot(Hg, Pg); %построение графика спектра "Мощность от высоты"
xlabel('Высота H, м'); %Подпись горизонтальной оси
ylabel('Мощность, P'); %Подпись вертикальной оси
grid on; %Включить вспомогательные линии
title(['Количество фацетов = ' num2str(k) '; ширина спектра по уровню 0.5 = ' num2str(deltaH) ' м']);
axis([Hmin*H0, Hmax*H0, 0, 1]); %ограничим область построения

```

## Лістинг функції layer.m

```

function [R, Hd, P, FVdop, FHdop] = layer(H0, DNA, DOR0, KREN, TANG, alp, F0, P0, step, varDNA, varDOR,
VN, VV, dhx, dHx, dDORx, Pix, alpx, dstepx)
%РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ
%Данная функция производит следующие операции: рассчитывает параметры
%пятна-прямоугольника, освещаемого радиовысотометром на подстилающей
%поверхности, рассчитывает параметры facets слоя. Результатом выполнения
%данной функции является массив наклонных дальностей, массив вертикальных
%высот (с учетом рельефа слоя), массив мощностей, отраженных от facets и
%доплеровские частоты.
%Входными параметрами функции являются два набора данных:
%H0=1000;
%DNA=40;
%DOR0=15;
%KREN = 0;
%TANG = 0;
%alp = 5;
%F0 = 4200 * 10^6;
%VN=0;
%VV=0;
%P0 = 1;
%step = 5;
%varDN =1;
%dhx =
%dHx =
%dDORx =
%Pix =
%высота ЛА (10...1500 м)
%ширина диаграммы направленности антенны, градусы
%диаграмма обратного рассеяния facets
%значение крена ЛА в градусах
%Значение тангажа ЛА в градусах
%среднеквадратическое отклонения нормали facets от вертикали
%Рабочая частота PB
%Горизонтальная скорость
%Вертикальная скорость
% мощность передатчика
%шаг сетки facets
%Коэффициент, показывающий тип аппроксимации ДЗР и ДНА
уровень дисперсии слоя (нормальное распределения)
средний уровень высоты в данном слое
уровень дисперсии ДЗР для слоя (нормальное распределения)
Средний уровень коэффициента отражения для слоя (Расп. Рэлея)
%alpx = коэффициент максимального угла отклонения нормали facets от вертикали
%dstepx = коэффициент шага для слоя
%=====
%нахождение параметров пятна, облучаемого радиовысотометром
H=H0 - dHx; %определение средней высоты (используется в случае нескольких слоев)
x0 = H*tan((TANG*pi)/(180)); %Координата x падения оси ДНА на плоскость
y0 = H*tan((KREN*pi)/(180)); %Координата y падения оси ДНА на плоскость
dx0 = H*tan((DNA*pi)/(2*180)); %определение параметров прямоугольника,
dy0 = dx0; %освещаемого PB
if TANG > 0 %расширение границ, вызванное Тангажом ЛА
dyp = H*tan((abs(TANG)*pi)/(180) + (DNA*pi)/(2*180)) - dx0;
dxn = 0;
elseif TANG < 0
dxn = H*tan((abs(TANG)*pi)/(180) + (DNA*pi)/(2*180)) - dx0;
dyp = 0;
elseif TANG == 0
dyp = 0;
dxn = 0;
end

if KREN > 0 %расширение границ, вызванное креном ЛА
dyp = H*tan((abs(KREN)*pi)/(180) + (DNA*pi)/(2*180)) - dy0;
dyn = 0;
elseif KREN < 0
dyn = H*tan((abs(KREN)*pi)/(180) + (DNA*pi)/(2*180)) - dy0;
dyp = 0;
elseif KREN == 0
dyp = 0;
dyn = 0;
end

```

```

%=====
%Определяем границы прямоугольника - сетки из facets (округляем до десятка):
Xmin = -(ceil((dx0 + dxn) / 10)) * 10;
Xmax = (ceil((dx0 + dxp) / 10)) * 10;
Ymin = -(ceil((dy0 + dyn) / 10)) * 10;
Ymax = (ceil((dy0 + dyp) / 10)) * 10;
%=====
%Расчет параметров facets
%=====
k=0; %обнуляем счетчик рассчитанных дальностей
for i= Xmin : dstepx*step : Xmax
    for j= Ymin : dstepx*step : Ymax
        %Исходные параметры для facets: высота, ДЗР, коэффициент отражения,
        %угол отклонения facets, фаза facets
        H=H0 - dHx - dhx * randn(1);
        DOR = DOR0 + abs(dDORx * randn(1));
        Pi = raylrnd(Pix);
        alpha = abs(randn(1)*alp)*alp*pi/180;
        beta = rand(1)*2*pi;
        %Координаты нормального вектора для facets.
        nx = (sin(alpha)) * (cos(beta)); %координата "X" нормального вектора
        ny = (sin(alpha)) * (sin(beta)); %координата "Y" нормального вектора
        nz = cos(alpha); %координата "Z" нормального вектора
        %расчет рельефа почвы
        %расчет ДЗР
        %угол отклонения от вертикали
        %фаза (поворот)
        %Координаты направляющего вектора для линии наклонной дальности,
        %проведенной из центра исследуемого facets в центр ЛА:
        rx = -i;
        ry = -j;

        rz = H;

        %координаты направляющего вектора для отраженного от facets луча
        tx = i;
        ty = j;
        tz = H;
        %координаты направляющего вектора для оси ДНА
        ax = -x0;
        ay = -y0;
        az = H;
        %Вычисляем косинус угла между направляющим вектором наклонной
        %дальности и нормальным вектором facets, находим угол между ними
        COSfi = (nx*rx + ny*ry + nz*rz)/((sqrtm(nx^2 + ny^2 + nz^2))*(sqrtm(rx^2 + ry^2 + rz^2)));
        fi = (180/pi)*acos(COSfi);
        %Вычисляем косинус угла между направляющим вектором линии дальности
        %и осью ДНА. Находим угол между ними
        COSfia = (ax*rx + ay*ry + az*rz)/((sqrtm(ax^2 + ay^2 + az^2))*(sqrtm(rx^2 + ry^2 + rz^2)));
        fia = (180/pi)*acos(COSfia);
        %Вычисляем косинус угла между отраженным лучом и осью ДНА
        %находим угол между ними
        COSfit = (ax*tx + ay*ty + az*tz)/((sqrtm(ax^2 + ay^2 + az^2))*(sqrtm(tx^2 + ty^2 + tz^2)));
        fit = (180/pi)*acos(COSfit);
        %находим расстояние в горизонтальной плоскости от нормали к ЛА
        %до точки падения луча антенны
        %определяем наклонную дальность от ЛА до центра facets
        L0 = sqrtm(i^2+j^2); %расстояние в горизонтальной плоскости
        R0 = sqrtm(L0^2+H^2); %наклонная дальность
        %=====
        %Находим доплеровское приращение частоты, вызванное горизонтальной
        %скоростью:
        %находим время прохождения сигнала ЛА-земля-ЛА при отсутствии
        %скорости:
        Tmin = 2 * R0 / (3*10^8);
        %находим расстояние, которое пролетит ЛА за это время при заданной
        %скорости:
        dL = VH * Tmin;
        %Пересчитываем расстояние в горизонтальной плоскости и наклонную
        %дальность:
        L1 = sqrtm((i - abs(dL))^2+j^2); %расстояние в горизонтальной плоскости
        R1 = sqrtm(L1^2+H^2); %наклонная дальность
        % исходя из разной длины излученного и отраженного лучей линий
        % наклонной дальности, находим доплеровскую скорость и доплеровское
        % приращение частоты по общей формуле:
        VHdop0 = (R1-R0)/Tmin; % доплеровская скорость
        FHdop0 = F0*(1+(VHdop0/(3*10^8)))/(1-(VHdop0/(3*10^8))) - F0;
        %Находим доплеровское приращение частоты, вызванное вертикальной
        %скоростью
        dH = VV * Tmin; %Расстояние, которое пролетит ЛА при заданной скорости
        R2 = sqrtm(L0^2+(H-dH)^2); %длина отраженной линии дальности
    end
end

```

```

VVdop0 = (R2-R0)/Tmin;    %Доплеровская скорость
FVdop0 = F0*(1+(VVdop0/(3*10^8)))/(1-(VVdop0/(3*10^8))) - F0;
%=====

end

end

%записываем в массив значения наклонных дальностей, высот,
%доплеровских частот:
k = k+1;    %инкрементируем счетчик элементов массива дальностей
R(k) = R0;    %записываем элемент массива дальностей
Hd(k) = H;    %записываем элемент массива высот
FHdop(k) = FHdop0; %записываем элемент массива горизонтальных доплеровских частот
FVdop(k) = FVdop0; %записываем элемент массива вертикальных доплеровских частот
%рассчитываем мощность, которая вернулась в приемную антенну
K=(P0*((3*10^80/F0)))/((4*pi)^3);    %Коэффициент постоянных параметров
if varDNA == 1
    Ga = exp(-((0.59*fia)/(DNA/2))^2);    %аппроксимация ДНА, Гаусс
elseif varDNA == 2
    Ga = abs(cos((fia * pi)/(DNA * 2.5/ 2)))/(1 + abs((fia * pi)/(DNA * 2.5/ 2)));
elseif varDNA == 3
    Ga = abs(sin((fia * pi)/(DNA * 1.65 / 2)))/abs((fia * pi)/(DNA * 1.65 / 2));
end
if varDOR == 1
    Gd = exp(-((0.59*fi)/(DOR/2))^2);    %аппроксимация ДЗР, Гаусс
elseif varDOR == 2
    Gd = abs(cos((fi * pi)/(DOR * 2.5/ 2)))/(1 + abs((fi * pi)/(DOR * 2.5/ 2)));
elseif varDOR == 3
    Gd = abs(sin((fi * pi)/(DOR * 1.65 / 2)))/abs((fi * pi)/(DOR * 1.65 / 2));
end
dS = step^2;    %площадь факета
P(k) = K*dS*Pi*((Ga^2)*Gd)/(R(k)^4);    %мощность отраженного сигнала

```

## Лістинг функции layer3D.m

```

function [R, Hd, P, FVdop, FNdop] = layer3D(H0, DNA, DOR0, KREN, TANG, F0, P0, varDNA, varDOR, VH, VV,
dDORx, Pix, pointer, XYZ)
%РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ
%Данная функция производит следующие операции: рассчитывает параметры
%пятна-прямоугольника, освещаемого радиовысотометром на подстилающей
%поверхности, рассчитывает параметры facets слоя. Результатом выполнения
%данной функции является массив наклонных дальностей, массив вертикальных
%высот (с учетом рельефа слоя), массив мощностей, отраженных от facets и
%доплеровские частоты.
%Входными параметрами функции являются два набора данных:
%Набор общих данных (одинаков для всех слоев):
%N0=1000;
%DNA=40;
%DOR0=15;
%KREN = 0;
%TANG = 0;
%F0 = 4200 * 10^6;
%VH=0;
%высота ЛА (10...1500 м)
%ширина диаграммы направленности антенны, градусы
%диаграмма обратного рассеяния facets
%значение крена ЛА в градусах
%Значение тангажа ЛА в градусах
%Рабочая частота РВ
%Горизонтальная скорость
%Вертикальная скорость
% мощность передатчика
%Коэффициент, показывающий тип аппроксимации ДЗР и ДНА
%Массив указателей на координаты
%Массив координат
%VV=0;
%P0 = 1;
%varDN =1;
%Pointer =
%XYZ =
%Набор данных для конкретного слоя:
%dDORx = уровень дисперсии ДЗР для слоя (нормальное распределения)
%Pix = Средний уровень коэффициента отражения для слоя
%dPix = максимальный уровень добавки коэффициента отражения (равномерное распределение)
%=====
x0 = N0*tan((TANG*pi)/(180)); %Координата x падения оси ДНА на плоскость
y0 = N0*tan((KREN*pi)/(180)); %Координата y падения оси ДНА на плоскость
%=====
k=0; %обнуляем счетчик рассчитанных дальностей
%Запускаем цикл. Количество шагов равно количеству строк файла указателя
for i = 1 : length(pointer)
    x1 = XYZ((pointer(i, 1))), 1); %Координата X первой вершины
    y1 = XYZ((pointer(i, 1))), 2); %Координата Y первой вершины
    z1 = XYZ((pointer(i, 1))), 3); %Координата Z первой вершины
    x2 = XYZ((pointer(i, 2))), 1); %Координата X второй вершины
    y2 = XYZ((pointer(i, 2))), 2); %Координата Y второй вершины
    z2 = XYZ((pointer(i, 2))), 3); %Координата Z второй вершины
    x3 = XYZ((pointer(i, 3))), 1); %Координата X третьей вершины
    y3 = XYZ((pointer(i, 3))), 2); %Координата Y третьей вершины
    z3 = XYZ((pointer(i, 3))), 3); %Координата Z третьей вершины
    XC = (x1 + x2 + x3)/3; %Координата X центра масс полигона
    YC = (y1 + y2 + y3)/3; %Координата Y центра масс полигона
    ZC = (z1 + z2 + z3)/3; %Координата Z центра масс полигона
    XN = y1*(z2-z3)+y2*(z3-z1)+y3*(z1-z2); %Координата X нормального вектора
    YN = z1*(x2-x3)+z2*(x3-x1)+z3*(x1-x2); %Координата Y нормального вектора
    ZN = x1*(y2-y3)+x2*(y3-y1)+x3*(y1-y2); %Координата Z нормального вектора
    Ax = x2-x1; %Вычисление значений координат двух векторов, основанных на
    Ay = y2-y1; %вершинах полигона-треугольника
    Az = z2-z1; %Затем вычисляются значения трех определителей, чтобы
    Bx = x3-x1; %найдем значение векторного произведения этих векторов
    By = y3-y1; %Находим длину результирующего вектора и умножаем на 0,5
    Bz = z3-z1; %Это будет площадь полигона-треугольника.
    DS = 0.5*sqrtm(((Ay*Bz-Az*By)^2) + ((Ax*Bz-Az*Bx)^2) + ((Ax*By-Ay*Bx)^2));
%Исходные параметры для facets: высота, ДЗР, коэффициент отражения,
%угол отклонения facets, фаза facets
H=N0 - ZC; %Высоты данного facets
DOR = DOR0 + dDORx * rand(1); %расчет ДЗР
Pi = raylrnd(Pix); %расчет коэффициента отражения от facets
%Координаты нормального вектора для facets.
nx = XN; %координата "x" нормального вектора

```

```

ny = YN; %координата "Y" нормального вектора
nz = ZN; %координата "Z" нормального вектора
%Координаты направляющего вектора для линии наклонной дальности,
%проведенной из центра исследуемого факета в центр ЛА:
rx = -XC;
ry = -YC;

rz = H;

%координаты направляющего вектора для оси ДНА
ax = -x0;
ay = -y0;
az = H;
%Вычисляем косинус угла между направляющим вектором наклонной
%дальности и нормальным вектором факета, находим угол между ними
COSfi = (nx*rx + ny*ry + nz*rz)/((sqrtm(nx^2 + ny^2 + nz^2))*(sqrtm(rx^2 + ry^2 + rz^2)));
fi = (180/pi)*acos(COSfi);
%Вычисляем косинус угла между направляющим вектором линии дальности
%и осью ДНА. Находим угол между ними
COSfia = (ax*rx + ay*ry + az*rz)/((sqrtm(ax^2 + ay^2 + az^2))*(sqrtm(rx^2 + ry^2 + rz^2)));
fia = (180/pi)*acos(COSfia);
%находим расстояние в горизонтальной плоскости от нормали к ЛА
%до точки падения луча антенны
%определяем наклонную дальность от ЛА до центра факета
L0 = sqrtm(XC^2+YC^2); %расстояние в горизонтальной плоскости
R0 = sqrtm(L0^2+H^2); %наклонная дальность
%=====
%Находим доплеровское приращение частоты, вызванное горизонтальной
%скоростью:
%находим время прохождения сигнала ЛА-земля-ЛА при отсутствии
%скорости:
Tmin = 2 * R0 / (3*10^8);
%находим расстояние, которое пролетит ЛА за это время при заданной
%скорости:
dL = VH * Tmin;
%Пересчитываем расстояние в горизонтальной плоскости и наклонную
%дальность:
L1 = sqrtm((XC - abs(dL))^2+YC^2); %расстояние в горизонтальной плоскости
R1 = sqrtm(L1^2+H^2); %наклонная дальность
% исходя из разной длины излученного и отраженного лучей линий
% наклонной дальности, находим доплеровскую скорость и доплеровское
% приращение частоты по общей формуле:
VHdop0 = (R1-R0)/Tmin; % доплеровская скорость
FNdop0 = F0*(1+(VHdop0/(3*10^8)))/(1-(VHdop0/(3*10^8))) - F0;
%Находим доплеровское приращение частоты, вызванное вертикальной
%скоростью
dH = VV * Tmin; %Расстояние, которое пролетит ЛА при заданной скорости
R2 = sqrtm(L0^2+(H-dH)^2); %длина отраженной линии дальности
VVdop0 = (R2-R0)/Tmin; %Доплеровская скорость
FVdop0 = F0*(1+(VVdop0/(3*10^8)))/(1-(VVdop0/(3*10^8))) - F0;
%=====
%записываем в массив значения наклонных дальностей, высот,
%доплеровских частот:
k = k+1; %инкрементируем счетчик элементов массива дальностей
R(k) = R0; %записываем элемент массива дальностей
Hd(k) = H; %записываем элемент массива высот
FNdop(k) = FNdop0; %записываем элемент массива горизонтальных доплеровских частот
FVdop(k) = FVdop0; %записываем элемент массива вертикальных доплеровских частот
%рассчитываем мощность, которая вернулась в приемную антенну
K=(P0*((3*10^80/F0)))/((4*pi)^3); %Кэффициент постоянных параметров
if vardDNA == 1
    Ga = exp(-((0.59*fia)/(DNA/2))^2); %аппроксимация ДНА, Гаусс
elseif vardDNA == 2
    Ga = abs(cos((fia * pi)/(DNA * 2.5/ 2)))/(1 + abs((fia * pi)/(DNA * 2.5/ 2)));
elseif vardDNA == 3
    Ga = abs(sin((fia * pi)/(DNA * 1.65 / 2)))/abs((fia * pi)/(DNA * 1.65 / 2));
end
if varDOR == 1
    Gd = exp(-((0.59*fi)/(DOR/2))^2); %аппроксимация ДЗР, Гаусс
elseif varDOR == 2
    Gd = abs(cos((fi * pi)/(DOR * 2.5/ 2)))/(1 + abs((fi * pi)/(DOR * 2.5/ 2)));
elseif varDOR == 3
    Gd = abs(sin((fi * pi)/(DOR * 1.65 / 2)))/abs((fi * pi)/(DOR * 1.65 / 2));
end
dS = DS; %площадь факета
P(k) = K*dS*Pi*(((Ga^2)*Gd)/(R(k))^4); %мощность отраженного сигнала
end

```